



Montanuniversität Leoben
Lehrstuhl für Gießereikunde,
Department für Metallurgie
Vorstand Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher



DIPLOMARBEIT

Thema:

***Experimentelle Untersuchung der Mitführung
der Schmelze an der Kokilleninnenwand bei
einem horizontalen Schleudergießprozess***

Ersteller:

Roland Lackner

Betreuer:

Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr. Peter Schumacher

Dr. Erhard Kaschnitz



Leoben, im November 2010

Kurzfassung

Rohre für die Trinkwasserversorgung werden im horizontalen Schleuderguss hergestellt. In diesem Verfahren wird Gusseisen auf eine rotierende, gehämmerte Kokille aufgegossen. Während des Gießprozesses ist die Mitnahme der Schmelze entscheidend. Zur Bestimmung der Reibung zwischen der Schmelze und der Kokille wurde eine Versuchsanlage angefertigt. Auf dieser Versuchsschleudergussanlage wurden horizontale und vertikale Versuche zur experimentellen Bestimmung der Reibung durchgeführt. Diese Versuche erfolgten mit Wasser und einer niedrig schmelzenden Pb-Bi-Sn-Legierung. Es wurde die minimale Drehzahl für eine vollständige Ausbildung eines zylindrischen Flüssigkeitsringes und die Verschiebung des Flüssigkeitskeils ermittelt. Weiters wurden Versuche zum Aufgießen von Gusseisen auf einen rotierenden Teller durchgeführt. Aus den Experimenten konnte eine Abhängigkeit der kritischen Drehzahl und der Verschiebung des Flüssigkeitskeils von der Schichtdicke und der Viskosität festgestellt werden. Diese Abhängigkeit konnte erfolgreich als Eingangsparameter für Simulationen verwendet werden.

Abstract

Pipes for the water supply are manufactured by horizontal centrifugal casting. In this procedure a hammered die mould is used and cast iron is cast onto the rotating mould. During the casting process the rotational transport of the melt is critical. In order to determine the friction between the melt and the mould a test plant was build. Horizontal and vertical centrifugal casting investigations for the experimental determination of the friction were conducted. In these experiments water and a low melting Pb-Bi-Sn-alloy were used. The minimum number of revolutions of the mould, which a complete formation of a cylindrical ring of the fluid was detected and the angle movement of the fluid leading edge was measured. In further experiments cast irons was cast onto a rotating plate. From these experiments a dependence of the critical rotational speed and the shift of the liquid angle were determined from the layer thickness and viscosity. These data were successful used as initial parameters for several simulations.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

.....
Roland Lackner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Erhard Kaschnitz vom Österreichische Giesserei-Institut, der mit viel Engagement und Einsatz meine Diplomarbeit betreut hat.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinem Referenten Herrn Prof. Dr. Peter Schumacher, der stets für mich ansprechbar war und mich tatkräftig unterstützt hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn DI. Harald Tschenett und Herrn DI. Roland Satlov von Duktus für die tatkräftige Unterstützung.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern des Österreichische Giesserei-Institut, welche zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Großer Dank gebührt meinen Eltern, die mir die Möglichkeit eines Studiums gaben und mich durch dieses mit großer Unterstützung begleitet haben.

Akronyme

| | |
|--------------|---|
| DSLR | Digitale Spiegelreflexkamera |
| FI | Fehlerstromschutzschalter |
| fps | Frames per second (Bildaufnahmefrequenz) |
| FU | Frequenzumrichter |
| GF-Konverter | Georg-Fischer-Konverter |
| NSG | Navier- Stokes'sche Gleichungen |
| RPS | Reibparameter Simulation |
| ÖGI | Österreichisches Giesserei-Institut, Leoben |

Verwendete Formelzeichen

| Symbol | Einheit | Größe |
|----------------------------|--------------------------------|--|
| a_{radial} | $[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$ | Radialbeschleunigung |
| a | $[\text{mm}]$ | Abstand |
| b | $[1]$ | Konstante |
| C_e | $[-]$ | Kohlenstoffäquivalent |
| F_g | $[\text{N}]$ | Gewichtskraft |
| F_i | $[1]$ | Wirkkoeffizient |
| F_r | $[\text{n}]$ | Reibkraft |
| F_{zentr} | $[\text{N}]$ | Zentrifugalkraft |
| h | $[\text{m}]$ | Schichthöhe |
| $h_{\text{ferrostatisch}}$ | $[\text{m}]$ | ferrostatische Säule |
| h_{krit} | $[\text{m}]$ | Schichthöhe bei kritischer Geschwindigkeit |
| k | $[\text{m}]$ | Wandrauhigkeit |
| n | $[\text{min}^{-1}]$ | Drehzahl der Kokille |
| p | $[\text{Pa}]$ | Druck |
| r | $[\text{m}]$ | Innenradius der Kokille |

| | | |
|------------|------------------------|-----------------------------------|
| R_e | [1] | Reynoldszahl |
| S_c | [-] | Sättigungsgrad |
| v_s | [m/s] | Einströmgeschwindigkeit |
| v_{krit} | [m/s] | Kritische Umfangsgeschwindigkeit |
| v_u | [m/s] | Umfangsgeschwindigkeit |
| X_i | [%] | Konzentration |
| μ | [1] | Reibwert |
| η | [Pa·m ⁻²] | dynamische Viskosität |
| ρ | [g·cm ⁻³] | Dichte des Mediums |
| ω | [rad·s ⁻¹] | Winkelgeschwindigkeit der Kokille |
| Φ | [rad] | Winkel |

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Kurzfassung | I |
| Abstract | II |
| Eidesstattliche Erklärung | III |
| Danksagung | IV |
| Akronyme | V |
| Verwendete Formelzeichen | VI |
| Inhaltsverzeichnis | VIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 3 |
| 2.1 Schleuderguss..... | 3 |
| 2.1.1 Allgemeines..... | 3 |
| 2.1.2 Formguss..... | 3 |
| 2.1.3 Schleuderguss mit vertikaler Rotationsachse..... | 4 |
| 2.1.4 Schleuderguss mit horizontaler Rotationsachse..... | 5 |
| 2.2 Strömungsmechanische Grundlagen..... | 7 |
| 2.2.1 Horizontaler Bereich..... | 7 |
| 2.2.2 Staupunktströmung..... | 13 |
| 2.2.3 Reibung zwischen einer Oberfläche und einem Fluid..... | 15 |
| 2.2.4 Ausbildung der Strömung in der Kokille..... | 18 |
| 2.3 Gusseisen..... | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.1 | Eisen-Kohlenstoff-System | 20 |
| 2.3.2 | Einfluss der Legierungselemente | 21 |
| 2.3.3 | Erstarrung des Gusseisens | 26 |
| 2.3.4 | Gusseisen mit Kugelgraphit..... | 26 |
| 2.4 | Roses'sche Legierung | 28 |
| 3 | Versuchsaufbau..... | 30 |
| 3.1 | Überblick über den Schleudergießversuchsstand | 30 |
| 3.2 | Aufbau der Versuchsanlage..... | 30 |
| 3.2.1 | Mechanischer Aufbau | 30 |
| 3.2.1.1 | Konstruktion des Gestells..... | 31 |
| 3.2.1.2 | Mechanischer Teil des Antriebs | 32 |
| 3.2.2 | Elektrischer Aufbau | 36 |
| 3.2.2.1 | Elektromotor | 36 |
| 3.2.2.2 | Schaltschrank | 36 |
| 3.2.2.3 | Computersteuerung | 39 |
| 3.2.3 | Sicherheitstechnik..... | 40 |
| 3.3 | Verwendete Kokillen | 42 |
| 3.3.1 | Oberfläche der Kokillen | 42 |
| 3.3.2 | Geschlossene Kokille | 43 |
| 3.3.3 | Offene Kokille | 44 |
| 3.3.4 | Rotierender Teller | 45 |
| 3.4 | Experimentelle Methoden | 46 |
| 3.4.1 | Allgemein | 46 |
| 3.4.2 | Versuche mit der geschlossenen Kokille..... | 48 |
| 3.4.2.1 | Allgemein | 48 |
| 3.4.2.2 | Mitnahme im laminaren Bereich | 49 |
| 3.4.2.3 | Kritische Umfangsgeschwindigkeit | 50 |
| 3.4.3 | Versuche mit der offenen Kokille..... | 52 |
| 3.4.4 | Versuche mit dem rotierenden Teller | 53 |
| 4 | Ergebnisse und Diskussion | 55 |
| 4.1 | Versuche mit der geschlossenen Kokillen..... | 55 |
| 4.1.1 | Mitnahme der Schmelze im laminaren Bereich..... | 55 |
| 4.1.2 | Kritische Geschwindigkeit..... | 60 |
| 4.2 | Offene Kokille | 66 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3 | Versuche mit dem Teller | 68 |
| 5 | Vergleich Versuchsergebnisse und erste Simulationen | 73 |
| 5.1 | Allgemein..... | 73 |
| 5.2 | Geschlossene Kokille | 73 |
| 5.3 | Rotierender Teller | 78 |
| 6 | Zusammenfassung | 79 |
| | Literaturverzeichnis..... | 86 |
| | Anhang | 90 |
| A. | Skizze Gestell..... | 90 |
| B. | Berechnungen | 91 |
| C. | Tabellen..... | 92 |

1 Einleitung

Wasserleitungsrohre werden im horizontalen Schleuderguss hergestellt. In den Grundzügen entspricht dieses Verfahren noch immer dem in den 1920er beschriebenen Verfahren von de Lavaud für die Herstellung von geschleuderten gusseisernen Rohren [1]. Dabei wird flüssiges Metall eine rotierende Kokille aufgegossen. Ursprünglich wurde im von de Lavaud beschriebenen Verfahren eine waagrechte Anordnung der Kokille verwendet. Dies ist heute nicht mehr der Fall, da eine Neigung der Kokille von 3-5° verwendet wird.

Da der Schleuderguss nur in einem sehr beschränkten Bereich in der Technik Anwendung findet, wurden die dafür nötigen komplexen Simulationen nicht angeboten bzw. die veröffentlichten Lösungen nur unzureichend validiert. Eine wichtige Größe für die Simulation ist die Reibung zwischen Kokille und Schmelze. Bei dieser Reibung handelt es sich um einen hydrodynamischen Vorgang und nicht um eine Reibung im Sinne einer Gleit- oder Festkörperreibung. Zur Bestimmung dieser Reibung wurde eine Anlage für Schleudergießversuche angefertigt. Die aus der experimentellen Durchführung gewonnenen Daten wurden zur Berechnung der auftretenden Reibung verwendet. Dieses Problem der Reibung ist den Reibproblemen in Flüssigkeitslagern (Tribologie) ähnlich.

Da die Reibung nur indirekt bestimmbar war, wurden mehrere unterschiedliche Versuche durchgeführt. Dabei wurden unterschiedliche Kokillen zur Bestimmung der Reibung bei unterschiedlichen Vorgängen bei einem Schleuderguss (instationäres Aufgießen und stationäres Gießen) verwendet. Dabei handelte es sich um eine offene, eine geschlossene

Kokille und um einen Teller. Die ermittelten Daten bezogen sich auf die auftretende Reibung zwischen der Kokillenwand und dem Fluid, welche die Mitnahme des Fluids bei einer Veränderung der Relativgeschwindigkeit bestimmten. Dabei wurde das Erreichen einer kritischen Umfangsgeschwindigkeit für die innerste Schicht des Fluids (Erfüllung der Loopingbedingung, daher Überschreiten des oberen Totpunktes) bestimmt. Über diese kritische Geschwindigkeit konnte eine Geschwindigkeitsverteilung im Fluid bestimmt werden (bekannte Umfangsgeschwindigkeit der Kokille und kritische Umfangsgeschwindigkeit an der innersten Schicht des Fluids) und daraus die Reibung errechnet werden. Weiters wurde die Mitnahme des Fluids bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten bestimmt. Da dies im laminaren Bereich stattfand, konnte daraus ebenfalls die Auftretende Reibung berechnet werden. Der in den Simulationen verwendete Reibparameter wurde so variiert, dass eine Abbildung der Versuche mittels Simulationen möglich war. Die Simulationen wurden von Hr. Dr. Kaschnitz am ÖGI durchgeführt. In Abbildung 1-1 ist das Eingießen in eine Schleudergußmaschine dargestellt.



Abbildung 1-1: Einguss von GJS in eine Schleudergussmaschine.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Schleuderguss

2.1.1 Allgemeines

Der Schleuderguss ist ein Gießverfahren, welches eine rotierende Form zur Herstellung von Bauteilen verwendet [1]. Hierbei wird die Fliehkraft zur Formfüllung ausgenützt. Die Schleudergussverfahren können durch die Lage ihrer Rotationsachse unterschieden werden. Bei einer horizontalen, oder nur leicht aus der Horizontalen geneigten Rotationsachse spricht man von einem horizontalen Schleuderguss. Nimmt die Rotationsachse eine vertikale Position ein, spricht man von einem vertikalen Schleuderguss. Bekannt ist der Schleuderguß wahrscheinlich schon seit dem Altertum. Beweise dafür sind Schmuckstücke aus dem 3. Jahrhundert vor Christus. Die Entwicklung der Schleudergießverfahren war keine stetige, sondern wurde durch sprunghafte Ereignisse bestimmt. Die wichtigsten Ereignisse waren die Herstellung von Rohren aus Gusseisen und die Herstellung von Lagerbuchsen ab dem 1. Weltkrieg [2, 3].

2.1.2 Formguss

Der vertikale Schleuderguss kann auch im Formguss verwendet werden. Dabei wird die auftretende Radialbeschleunigung zur Formfüllung und Speisung verwendet. Verwendung findet diese Art des Schleudergusses bei der Herstellung medizinischen Implantaten,

Ventilen oder einfachen Bauteilen. Hierbei sind Titan, Aluminium, Zink und Magnesium eingesetzt worden. Dabei ist die Rotationsachse der Gussform nicht die Rotationsachse der Bauteile [2, 3, 5, 6, 7].

2.1.3 Schleuderguss mit vertikaler Rotationsachse

Bei einem vertikalen Schleuderguss wird eine Form mit einer vertikalen Rotationsachse eingesetzt. Durch eine solche Anordnung kommt es während der Formfüllung zur Ausbildung einer charakteristischen Oberflächenparabel an der Innenseite der Form. Diese Oberflächenparabel wird durch das verwendete Material und der bei der Formfüllung eingesetzten Drehzahl bestimmt. In Abbildung 2-1 ist die Ausbildung des Rotationsparaboloids im vertikalen Schleuderguss ersichtlich. In dieser Abbildung sind die Paraboloiden für eine hohe und eine niedrige Winkelgeschwindigkeit eingezeichnet [2, 8].

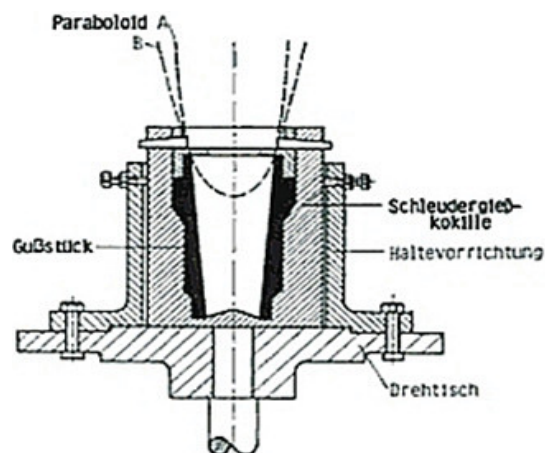


Abbildung 2-2: Rotationsparaboloid im Schleuderguss [2].

Dabei entspricht die Kurve A einem Paraboloid für eine hohe Winkelgeschwindigkeit und Kurve B für eine geringe Winkelgeschwindigkeit. Das Schema einer Anlage für den vertikalen Schleuderguss ist in Abbildung 2-2 ersichtlich. Darin ist eine Anlage in einer Unterflurbauweise (Kokille befindet sich unter Hüttenflurniveau) dargestellt. Anlagen dieser Bauform finden bei der Fertigung von Walzen Verwendung [2, 3, 4, 9].

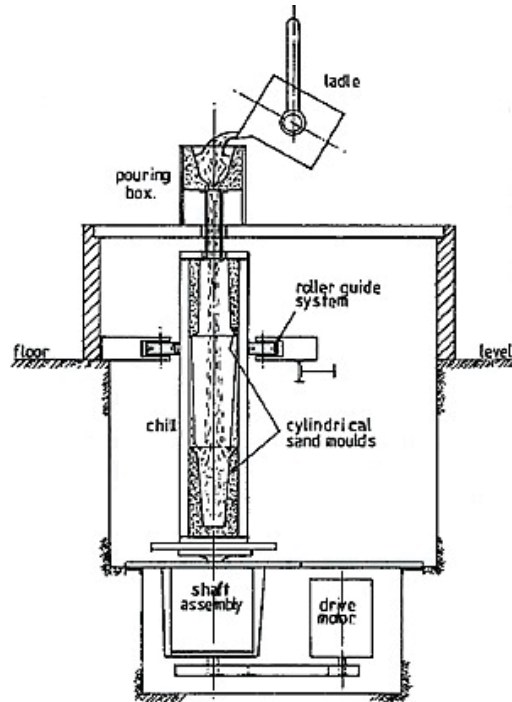


Abbildung 2-3: Schema eines vertikalen Schleudergusses [2].

Bei der in Abbildung 2-2 gezeigten Anlage erfolgt der Einguss direkt in die Kokille. Teilweise werden auch tangentielle Eingusssysteme verwendet. Der Vorteil liegt bei einem solchen Einguss darin, dass es zu geringeren Turbulenzen kommt [2, 3].

2.1.4 Schleuderguss mit horizontaler Rotationsachse

Von einem horizontalen Schleuderguss spricht man, wenn die Rotationsachse der Form in der Horizontalen liegt, oder nur geringfügig geneigt ist. Diese Form des Schleudergusses wird vorwiegend für Rohre und Walzen eingesetzt. Es können große Längen/Durchmesserhältnisse erzielt werden. Diese Form des Schleudergusses für gusseiserne Rohre wurde von de Lavaud in den 1920ern erstmalig beschrieben [1]. In Abbildung 2-3 ist der schematische Aufbau einer Anlage für den horizontalen Schleuderguss dargestellt.

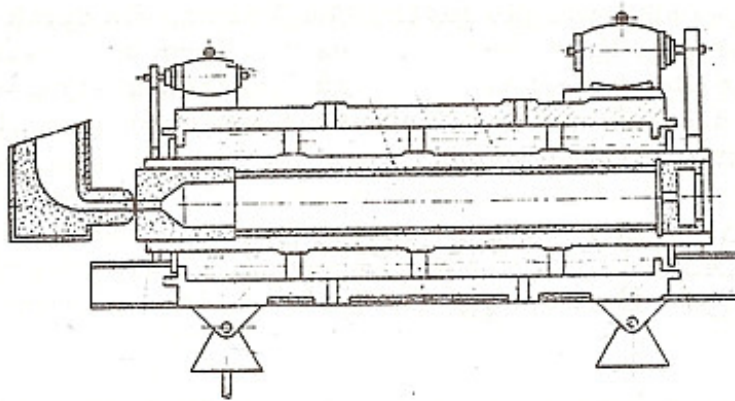


Abbildung 2-4: Schematischer Aufbau einer Anlage für den horizontalen Schleuderguss ohne Neigung der Kokille [2].

Für kleine Bauteile werden einzelne automatisierte Fertigungszellen eingesetzt. Dabei können bis zu 30 Fertigungseinheiten zu einer Zelle verbunden werden. Dies geschieht für Produkte wie Zylinderlaufbuchsen oder kleine Flansche. Große Bauteile wie Rohre oder Walzen werden über Einzelmaschinen hergestellt. Rohre, welche nach dem Verfahren von de Lavaud hergestellt werden, müssen nach dem Giessen wärmebehandelt werden. Diese Wärmebehandlung erfolgt, da die Schmelze teilweise im metastabilen Fe-C System erstarrt. Durch die Wärmebehandlung wird Zementit (Fe_3C) eingeformt und in Graphit umgewandelt [2, 4]. Für den horizontalen Schleuderguss gelten die gleichen Grundlagen wie für den vertikalen Schleuderguss (Kapitel 2.2). Es wird in der Praxis, um eine bessere Formfüllung zu erreichen, eine Neigung der Kokille von $3\text{-}5^\circ$, verwendet (Abbildung 2-4) [2, 3, 4, 9].

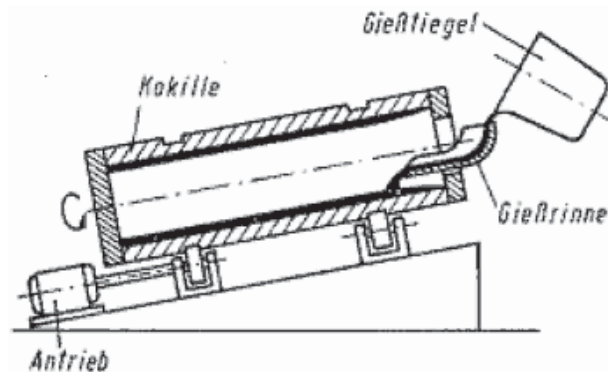


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines horizontalen Schleudergusses mit Neigung der Kokille [2].

Auf Grund der Wechselwirkung von Gravitation und Zentrifugalbeschleunigung kommt es wie im vertikalen Schleuderguss zur Ausbildung eines Rotationsparaboloids [10]. Durch die auftretende Zentrifugalbeschleunigung kommt es zu Seigerungen über den Querschnitt. Dabei sammeln sich leichte Elemente im Innenbereich und schwere Elemente im Außenbereich des Gussstückes an. Nichtmetallische Einschlüsse sammeln sich auf Grund ihrer geringen Dichte ebenfalls an der Innenseite des Gussstückes an [6, 11]. Im horizontalen Schleuderguss werden vorwiegend Aluminium-, Kupferlegierungen und Gusseisen zur Herstellung von Buchsen und Gusseisen für die Herstellung von Rohren eine Rolle [1, 2, 5].

2.2 Strömungsmechanische Grundlagen

2.2.1 Horizontaler Bereich

Die Grundlage zur Beschreibung der Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit sind die Navier- Stokes'schen Gleichungen. Die Gleichungen beschreiben das Geschwindigkeits- und Druckfeld in einem Fluid. Dabei wird ein infinit kleines Volumenelement dV (Kontrollraum) zur Betrachtung heran gezogen (Abbildung 2-6) [11, 12, 13, 14, 15, 16].

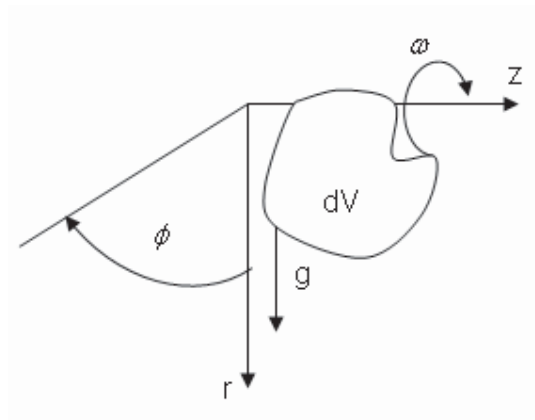


Abbildung 2-6: Volumenelement dV in Zylinderkoordinaten [21].

Da bei einer konstanten Dichte des Fluids die einströmende Masse gleich der ausströmenden Masse entspricht ergibt sich daraus die Kontinuitätsgleichung [17, 18, 19, 20, 21, 22]:

$$\nabla \vec{u} = 0 \quad (2-1)$$

Die Gleichung 2-1 gilt für ein inkompressibles Medium, daher kommt es zu keiner Dichteänderung mit der Zeit. Die Navier- Stokes'schen Gleichungen für ein zylindrisches Koordinatensystem ergibt sich nach Aufspaltung in die einzelnen Raumrichtungen [18, 22, 23, 24, 25, 26, 27]:

r- Richtung:

$$p \cdot \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{v_r \cdot \partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \cdot \frac{\partial v_r}{\partial \phi} + \frac{v_z \cdot \partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\phi^2}{r} \right) = \quad (2-2)$$

$$p \cdot f_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 v_r}{\partial \phi^2} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} \right)$$

Φ - Richtung:

$$p \cdot \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial t} + \frac{v_r \cdot \partial v_\phi}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \cdot \frac{\partial v_\phi}{\partial \phi} + \frac{v_z \cdot \partial v_\phi}{\partial z} + \frac{v_r \cdot v_\phi}{r} \right) = \quad (2-3)$$

$$p \cdot f_\phi - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 v_\phi}{\partial \phi^2} \right) + \frac{\partial^2 v_\phi}{\partial z^2} - \frac{v_\phi}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right)$$

z- Richtung:

$$p \cdot \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{v_r \cdot \partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\phi}{r} \cdot \frac{\partial v_z}{\partial \phi} + \frac{v_z \cdot \partial v_z}{\partial z} \right) = \quad (2-4)$$

$$p \cdot f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial \phi^2} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)$$

Die Hauptkomponenten des Kraftfeldes für ein Massenelement sind die Gewichtskraft dF_g , die Zentrifugalkraft dF_c und die Reibungskraft dF_r . Die Gewichtskraft dF_g setzt sich aus der Erdbeschleunigung g und dem Massenelement dm zusammen.

$$dF_g = g \cdot dm, \quad (2-5)$$

Der Zentrifugalkraft dF_{zentr} wird aus dem Radius r , der Winkelgeschwindigkeit ω und dem Massenelement dm gebildet.

$$dF_{zentr} = r \cdot \omega^2 \cdot dm \quad (2-6)$$

Durch die Winkelgeschwindigkeit ω und der metallostatistischen Säule $h_{ferrostatistisch}$ stellt sich an der Kokilleninnenseite ein Druck ein. Dieser Druck p errechnet sich aus der Dichte ρ multipliziert mit der Beschleunigung in radialer Richtung a_{radial} mit:

$$a_{radial} = r \cdot \omega^2 \quad (2-7)$$

Multipliziert mit der ferrostatistischen Säule $h_{metallostatistisch}$. Daraus ergibt sich:

$$p = a_{radial} \cdot h_{metallostatistisch} \quad (2-8)$$

In Abbildung 2-7 ist der Druck an der Kokillenwand in Abhängigkeit von der Schichtdicke für verschiedene Innendurchmesser bei einer konstanten Drehzahl von 400min^{-1} dargestellt

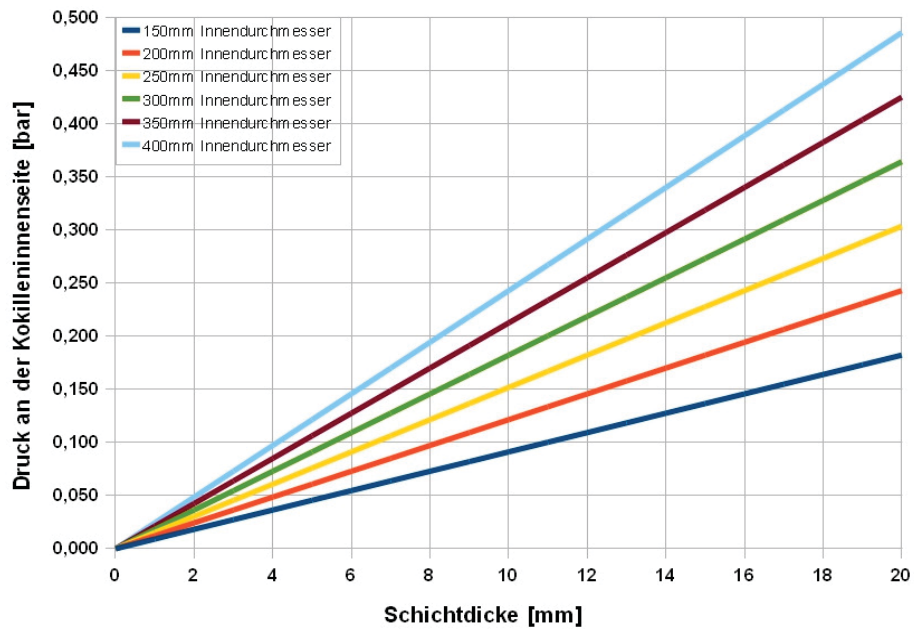


Abbildung 2-7: Auftretender Druck in Abhängigkeit von der Schichtdicke und des Kokillendurchmessers für eine Drehzahl von 400min^{-1} .

Aus Abbildung 2-7 ist ersichtlich, dass der im horizontalen Schleuderguss auftretende Druck an der Kokillennwand in einem Bereich von maximal 0,5 bar liegt. Dieser Druckbereich entspricht in etwa dem metallostatischen Druck, welcher bei einem Niederdruckkokillenguß auftritt. Um eine vollständige Formfüllung zu erreichen, muss im oberen Totpunkt der innersten Schicht des Fluids das Kräftegleichgewicht erfüllt werden (Abbildung 2-8).

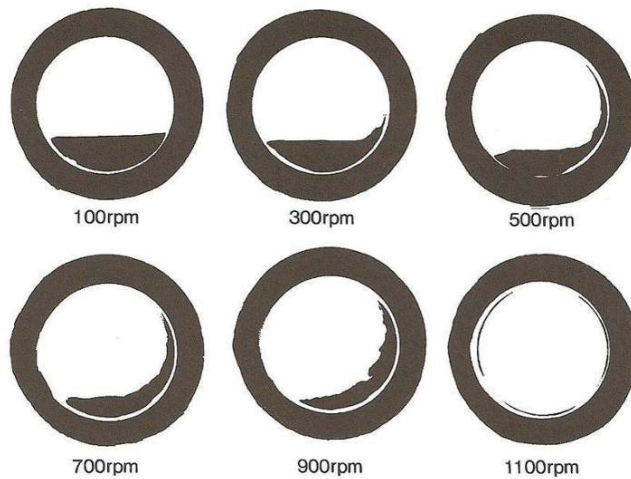


Abbildung 2-9: Ausbildung der Strömung im unterkritischen Bereich für eine bestimmte Geometrie bei Veränderung der Drehzahl der Kokille[34].

Die Veränderung der Strömung (Abbildung 2-9) mit steigender Umfangsgeschwindigkeit wurde von Nakayama [28] beschrieben. In dieser Betrachtung wird jedoch nicht auf den Einfluss der Reibung zwischen Zylinderoberfläche und Fluid sondern nur auf den Einfluss der Viskosität eingegangen.

Das zuvor beschriebene Kräftegleichgewicht setzt sich aus der Summe der Zentrifugalkraft F_{zentr} und der Gewichtskraft F_g zusammen. Überschreitet die Zentrifugalkraft F_{zentr} die Gewichtskraft, wird die so genannte Loopingbedingung erfüllt [27, 29]. Die Zentrifugalkraft setzt sich zusammen aus:

$$F_{zentr} = m \cdot (a_{radial}) \quad (2-9)$$

Für die Gewichtskraft F_g ergibt sich:

$$F_g = m \cdot g \quad (2-10)$$

Da sich die Masse heraus kürzt, ergibt sich für die Erfüllung der Loopingbedingung:

$$a_{\text{radial}} \geq g \quad (2-11)$$

Oder mit Einsetzen für die Radialbeschleunigung:

$$r \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2 \geq g \quad (2-12)$$

Die Reibungskraft dF_r setzt sich aus der dynamischen Viskosität η , dem Flächenelement dA , der Relativgeschwindigkeit dv und dem Dickenelement ds zusammen.

$$dF_r = \eta \cdot dA \cdot \frac{dv}{ds} \quad (2-13)$$

2.2.2 Staupunktströmung

Die ebene Staupunktströmung beschreibt das Auftreffen eines Fluids auf eine ebene Fläche [21, 30, 31]. Eine solche Strömung ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

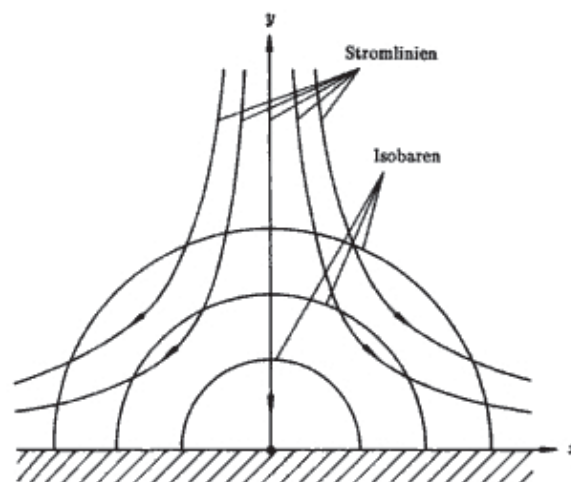


Abbildung 2-10: Ebene Staupunktströmung mit Stromlinien und Isobaren [28].

Die Geschwindigkeitsverteilung für die ebene Staupunktströmung lautet für die X-Richtung:

$$u = b \cdot x \quad (2-14)$$

Und für die Y-Richtung:

$$v = b \cdot y \quad (2-15)$$

In den Gleichungen 2-14 und 2-15 steht b für die gleiche Konstante. Die beiden Gleichungen (2-14 und 2-15) gelten nur, wenn der Einfluss der Viskosität nicht berücksichtigt wird. Wird der Einfluss der Viskosität mit berücksichtigt, ergibt sich für u :

$$u = a \cdot x \cdot f'(\eta) \quad (2-16)$$

Und für v :

$$v = -\sqrt{a \cdot \nu} \cdot f(\eta)$$

Aus der Navier- Stokes- Gleichung für die X-Richtung erhält man folgende Differenzialgleichung für die Funktion $f(\eta)$:

$$f''' + f \cdot f'' + 1 - f'^2 = 0 \quad (2-17)$$

Eine Beschreibung der Differenzialgleichung (2-17) wurde zuerst von Hiemenz [31] beschrieben. Die Lösung dieser Differenzialgleichung ist in Tabelle 2-I und Abbildung 2-11 angegeben.

Tabelle 2-I: Einflussfaktoren auf die Differenzialgleichung [30].

| eben | | | | axialsymmetrisch | | | |
|----------|----------------|------|--------|------------------|----------------|------|--------|
| η | f | f' | f'' | η | f | f' | f'' |
| 0 | 0 | 0 | 1,2326 | 0 | 0 | 0 | 1,3120 |
| ∞ | $\eta - 0,648$ | 1,0 | 0 | ∞ | $\eta - 0,569$ | 1,0 | 0 |

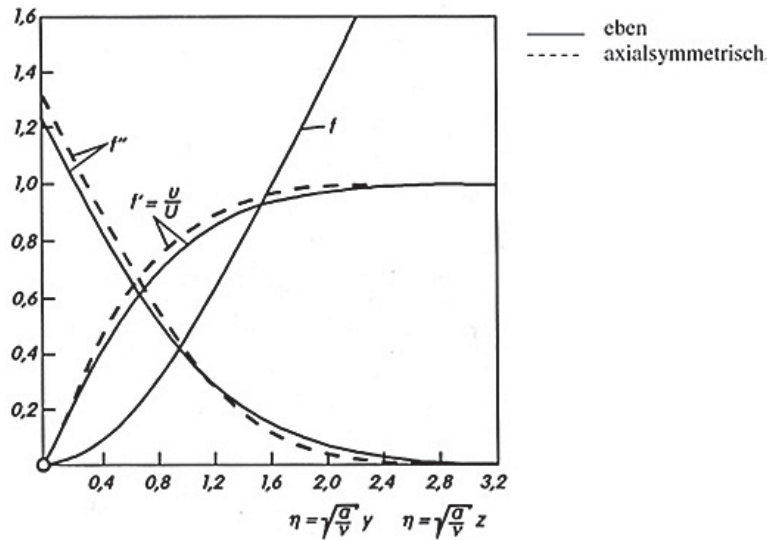


Abbildung 2-11: Geschwindigkeitsverteilung der ebenen und axialsymmetrischen Staupunktströmung [30].

2.2.3 Reibung zwischen einer Oberfläche und einem Fluid

Die Reibung zwischen der Kokille und einem Fluid ist von der Oberfläche der Kokille abhängig. Diese Abhängigkeit wird über die Rauheit k und in weiterer Folge durch die Reynolds-Zahl R_e ausgedrückt. Die Reynoldszahl R_e ist eine dimensionslose Kennzahl, welche das Turbulenzverhalten von Körpern beschreibt. Diese Kennzahl stellt das Verhältnis von der Strömungsgeschwindigkeit v_u multipliziert mit der durchflossenen Höhe h zur dynamischen Viskosität η dar [21, 31, 32].

$$R_e = \frac{v_u \cdot h \cdot \rho}{\eta} \quad (2-18)$$

Überschreitet die Reynoldszahl einen kritischen Wert welcher in der Regel mit 2300 angenommen wird, geht die laminare Strömung in eine turbulente Strömung über. Dieser Übergang erfolgt nicht schlagartig, sondern erfolgt über einen weiten Bereich. Aus der Gleichung 2-18 ergibt sich, wenn ν gegen 0 geht, wird R_e gegen unendlich gehen. Die

geschieht auch, wenn die Strömungsgeschwindigkeit v gegen unendlich geht. Dies würde bedeuten, dass es zu einer fast reibungsfreien Strömung kommt. Zur Bestimmung der Reibung sind unterschiedliche Lösungsansätze in der Literatur beschrieben. Diese Unterscheidung wird getroffen, da zwischen hydraulisch glatt, rau und einem Übergangsbereich unterschieden wird. Der hydraulisch glatte Bereich liegt zwischen $2320 < Re < 65 \cdot h/k$. Dabei steht h für die Dicke der Strömung (oder Durchmesser eines Rohres) und k für die Höhe des Rauigkeitsgebirges [21, 31]. In der Literatur wird für den Reibwert das Zeichen λ verwendet. Da dieses Zeichen λ jedoch im Bereich des Gießereiwesens für den Dendritenabstand und der Wärmeleitzahl steht, wird hier das Zeichen μ verwendet. Dieses Symbol wird auch in der Mechanik für den Reibwert verwendet. Für diesen Bereich (hydraulisch glatt) wird die Formel von Prandtl und Karaman verwendet:

$$\mu = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(R_e \cdot \sqrt{\frac{\mu}{2,51}} \right) \right]^2} \quad (2-19)$$

Alternativ kann die Gleichung mit Einsetzen für die Reynoldszahl R_e :

$$\mu = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(\frac{v_u \cdot h \cdot \rho}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{2,51}} \right) \right]^2} \quad (2-20)$$

verwendet werden.

Der in den Formeln enthaltene Wert von 2,51 ist kein rechnerischen Wert, sondern wurde experimentell bestimmt. Da in diesen Formeln (2-19 und 2-20) der Reibungsbeiwert in impliziter Form vorhanden ist, wird meist eine Näherungsformel verwendet [30]. Diese Näherungsformel lautet:

$$\mu = \frac{0,309}{\left[\log \left(\frac{v_u \cdot h \cdot \rho}{7 \cdot \eta} \right) \right]^2} \quad (2-21)$$

Für den hydraulisch rauen Bereiche ($Re > 1300 \cdot h/k$) ist der Reibwert eine Funktion von des Verhältnisses der Dicke der durchströmten Schicht zur Rauigkeit. In diesem Bereich ragen die Spitzen des Rauigkeitsgebirges vollständig aus der Grenzschicht heraus. Das bedeutet, dass dadurch Wirbel erzeugt werden, welche zu einem weiteren Energieverlust führen [21]. Für diesen Bereich wird die Formel:

$$\mu = \left(2 \cdot \log\left(\frac{h}{k}\right) + 1,74 \right)^2 \quad (2-22)$$

verwendet. Für den gesamten Bereich von hydraulisch glatt bis rau, wird der Reibwert durch das Verhältnisses der Dicke zur Rauigkeit beschrieben [21, 31]. Es kann hier die Reibwertformel nach Colebrook verwendet werden:

$$\frac{1}{\mu} = 1,74 - 2 \log\left(\frac{k}{h} + \frac{\eta \cdot 18,7}{v_u \cdot \rho \cdot h \cdot \sqrt{\mu}} \right) \quad (2-23)$$

In Formel 2-23 ist der Reibwert ebenfalls implizit vorhanden. Daraus ergibt sich ein erhöhter Aufwand zu dessen Bestimmung, welche iterativ erfolgt. Die Formel nach Colebrook kann auch für den gesamten Bereich von hydraulisch glatt zu hydraulisch rau verwendet werden [28]. Dies sieht man, da bei $Re \rightarrow \infty$ (Zähigkeitseinfluss geht gegen 0) und für $k/h \rightarrow 0$, die Reibwertformel für den glatten Bereich ergibt. Durch die Formeln 2-18 bis 2-23 kann der Reibwert für eine stationäre Strömung in einem inkompressiblen Medium beschrieben werden [18, 31, 32]. Durch diesen Reibwert, welcher von der Reynoldszahl und damit von der Strömungsgeschwindigkeit in der Kokille abhängig ist, kann die Reibung, welche einen Energieverlust darstellt, berechnet werden. In Abbildung 2-12 ist die Reibung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Strömungsformen ersichtlich.

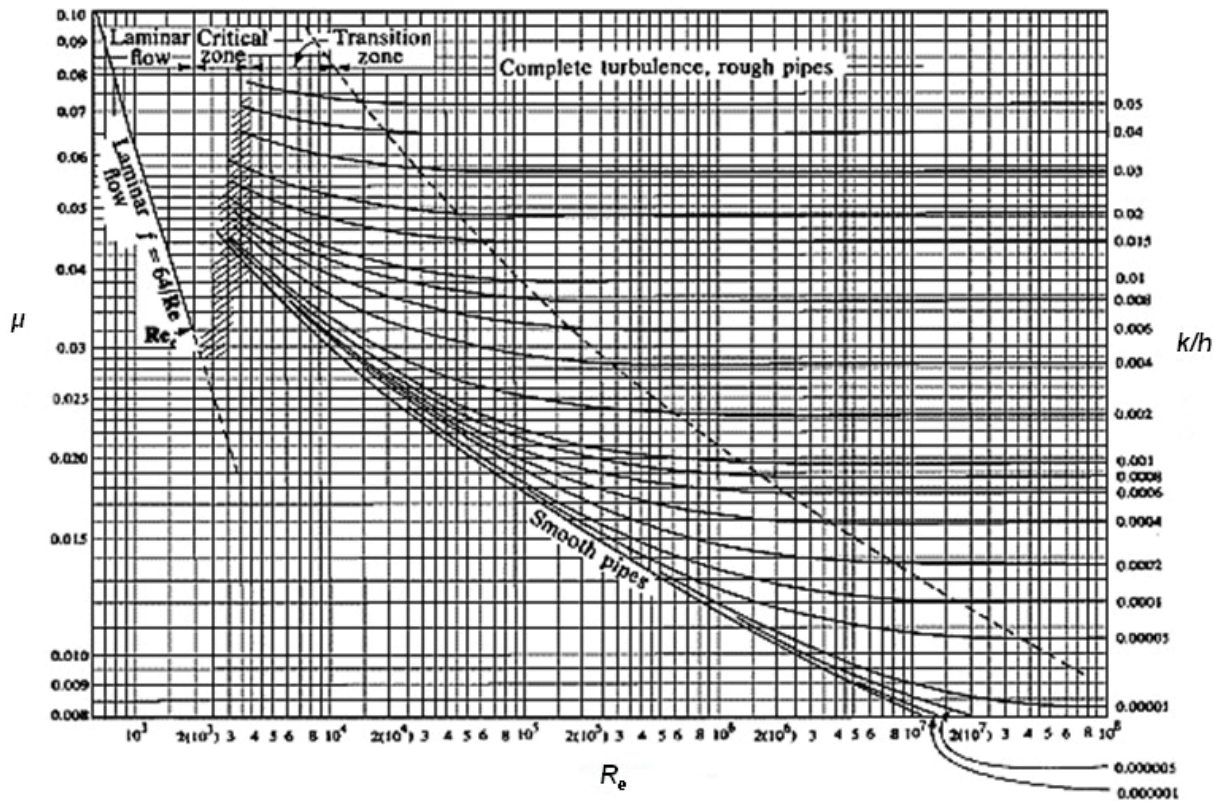


Abbildung 2-12: Colebrookdiagramm, welches die auftretenden Reibung zwischen einem Fluid und einer Wand in Abhängigkeit der Reynoldszahl und dem Verhältnis der Rauigkeit zur durchströmten Höhe zeigt [32].

Diese Diagramm (2-13) zeigt die Abhängigkeit der Reibung von der Reynoldszahl und dem Verhältnis von der vorhandenen Rauigkeit zur durchströmten Höhe.

2.2.4 Ausbildung der Strömung in der Kokille

Innerhalb des Fluids kommt es zu einer Überlagerung von unterschiedlichen Wellenformen. Diese Überlagerungen äußern sich in einer komplexen Wellenform an der Oberfläche. Hier spielt die Geometrie der Oberfläche der Kokille (Rauigkeit und Durchbiegung) eine Rolle. Einen weiteren Einfluss auf die Ausbildung haben Vibrationen in der Kokille [33, 34]. Die unterschiedlichen Wellenformen sind in Abbildung 2-13 ersichtlich.

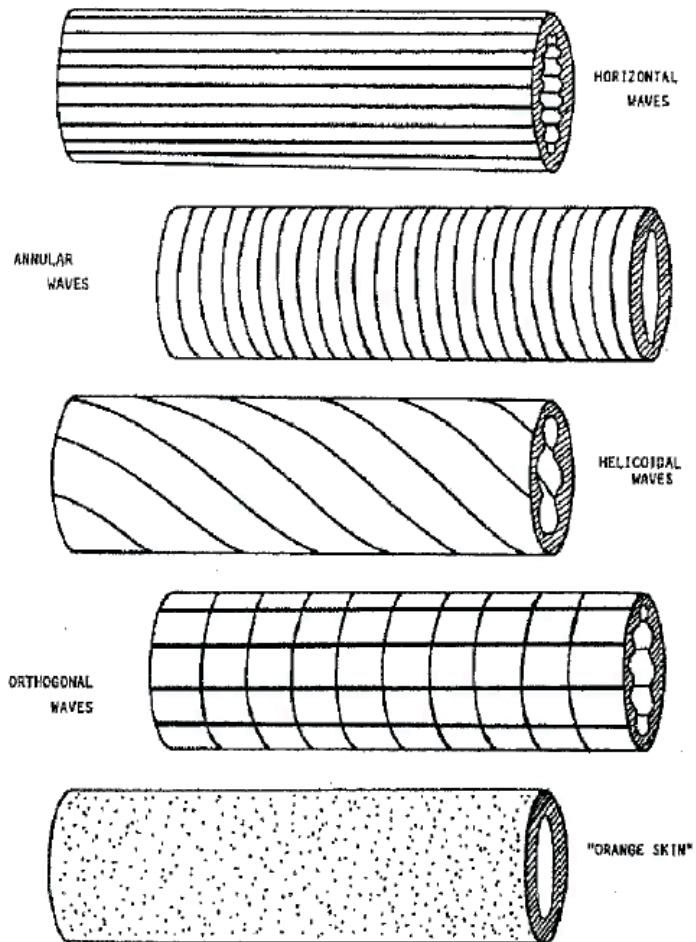


Abbildung 2-13: Wellenformen bei einem Fluid, die bei einem Schleuderguss auftreten können [34].

Die einzelnen Wellenformen sind horizontale-, radiale-, heliozentrische- und orthogonale Wellen. Durch die Überlagerung mit einer so genannten „Orangenhaut“ kommt es zu Ausbildung einer komplexen Oberflächenstruktur [34].

2.3 Gusseisen

2.3.1 Eisen-Kohlenstoff-System

Als Gusseisen werden jene Legierungen auf Eisenbasis bezeichnet, die einen Kohlenstoffanteil von mindestens 2,06% aufweisen. Dieser Kohlenstoffgehalt stellt die maximale Löslichkeit von Kohlenstoff im Austenit. Kennzeichen für Gusseisenlegierungen ist das Auftreten von eutektischen Gefügephasen. Unterhalb von 2,06% Kohlenstoff wird von Stahlguss gesprochen [35]. Das System Eisen-Kohlenstoff wird in der Literatur häufig als Doppelsystem bezeichnet. Dabei werden in einem Diagramm die Linien des metastabilen Systems (Eisen-Zementit) und des stabilen Systems (Eisen-Graphit) eingetragen. Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Systeme, welche sich aus einer Schmelze bilden können. Der Unterschied entsteht auf Grund von unterschiedlichen Abkühlbedingungen. Bei einer raschen Abkühlung findet die Erstarrung im metastabilen System (Fe_3C) statt. Bei langsamer Abkühlung wird eine Abkühlung im stabilen System (Graphit) erreicht. Abbildung 2-14 zeigt das Doppelsystem Eisen-Kohlenstoff, Eisen- Zementit [36, 37].

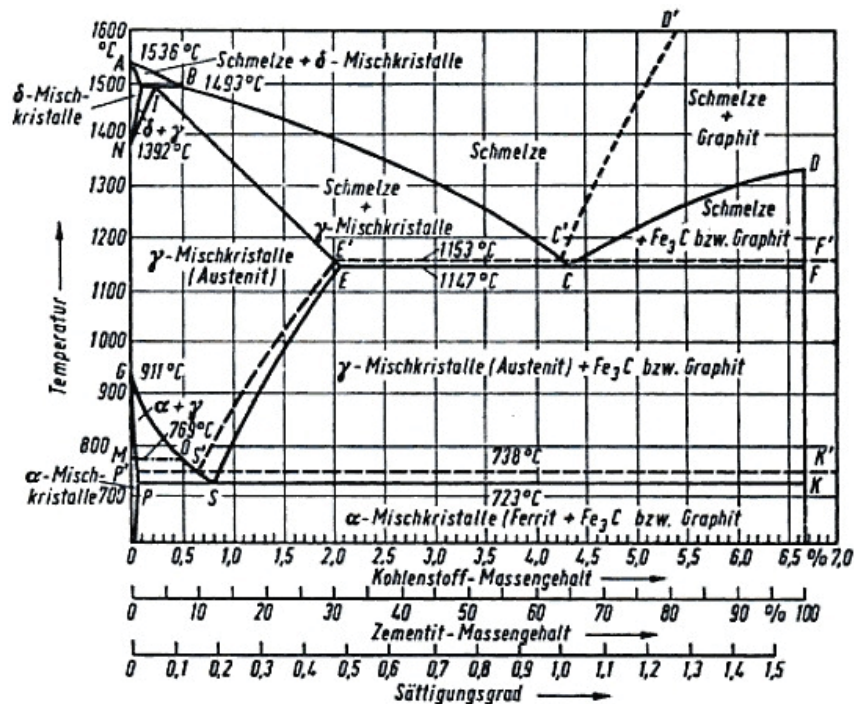


Abbildung 2-14: Eisen-Kohlenstoff-Diagramm [37].

Die beiden Systeme lassen sich in dieser Abbildung an Hand der unterschiedlichen Linien unterschieden. Dabei ist das metastabile System mit durchgezogenen Linien und das stabile System gestrichelt dargestellt. Dieses System ist eins der am besten beschriebenen Systeme in der Metallurgie. In der heutigen Literatur existieren unzählige ausführliche Abhandlungen zu diesem Thema [36, 37].

2.3.2 Einfluss der Legierungselemente

Gusseisen kann eine Reihe von unterschiedlichen Legierungselementen enthalten. Diese Legierungselemente werden gezielt für die Einstellung von unterschiedlichen Eigenschaften verwendet. Das wichtigste Legierungselement bei Gusseisen ist Silizium. Silizium erhöht die Kohlenstoffaktivität, was eine Erniedrigung der Kohlenstofflöslichkeit bewirkt. Dies führt zu einer Verschiebung des eutektischen Punktes zu niedrigeren Kohlenstoffgehalten. Gegenüber dem Fe-C System verschiebt sich der eutektische Punkt von 2,06 auf 2,8%C. Aus der eutektischen Linie des Zweistoffsystems wird ein Bereich in dem γ , Schmelze und Graphit bzw. γ , Schmelze und Zementit stabil sind und die die Stabilität von δ -Ferrit wird erhöht. Weiters kommt es zu einer Erhöhung der eutektischen Temperatur. In Abbildung 2-15 und 2-16 ist ein binärer Schnitt durch das ternäre System Fe-C-Si bei 2,4 und 4,8% Si zu sehen [37, 38, 39, 49].

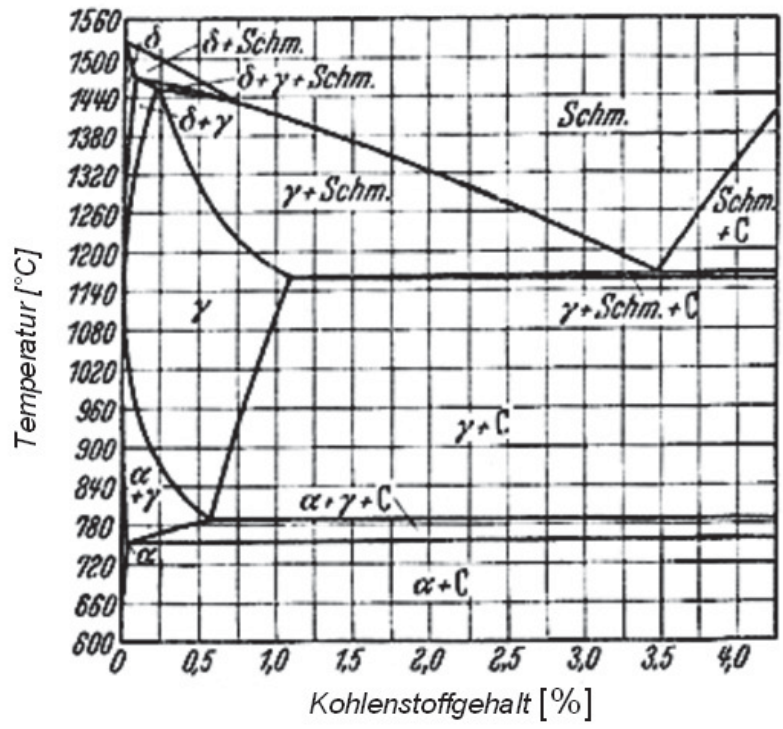


Abbildung 2-15: binärer Schnitt durch das Fe-C-Si-System bei 2,4% Si [37].

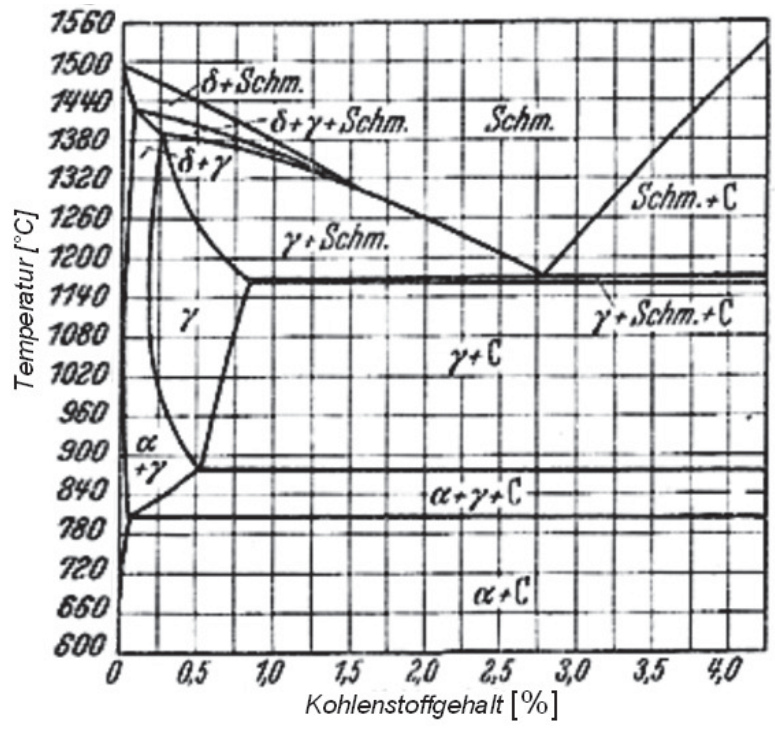


Abbildung 2-16: binärer Schnitt durch das Fe-C-Si-System bei 4,8% Si [37].

In diesen beiden Abbildungen 2-15 und 2-16 ist die Aufweitung des Bereiches von γ -Schmelze+ C zu sehen. Durch die Erhöhung der Kohlenstoffaktivität wird die Ausscheidung von kohlenstoffreichen Phasen begünstigt. Da Graphit praktisch zu 100% aus Kohlenstoff besteht, wird die Neigung zur Erstarrung im stabilen System bei verringerter Kohlenstofflöslichkeit steigert. Während bei steigender Kohlenstofflöslichkeit die Neigung zur metastabile Erstarrung erhöht. Zu den Elementen, welche die Karbidbildung fördern zählen: Wolfram, Molybdän, Tantal, Zirkon, Vanadium und Titan. Elemente, welche die Graphitbildung fördern sind: Silizium, Aluminium, Kupfer, Nickel, Kobalt, Zirkon, Phosphor und Schwefel [39, 40]. In Abbildung 2-17 ist der Einfluss der oben beschriebenen Legierungselemente auf die Kohlenstofflöslichkeit zu sehen:

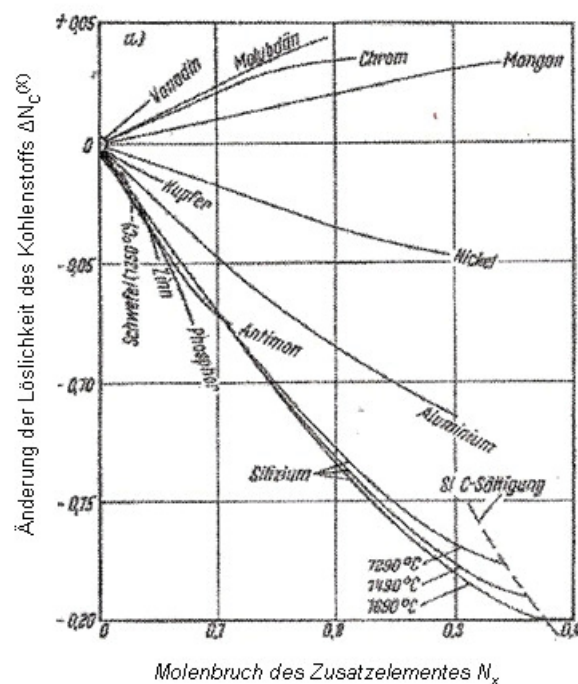


Abbildung 2-17: Einfluss der Legierungselemente auf die Kohlenstofflöslichkeit [40].

Der in Abbildung 2-17 gezeigte Einfluss der Legierungselemente wurde mittels experimenteller Methoden bestimmt. Jedoch sind in dieser Abbildung keine Fehlerbalken auf Grund von Messunsicherheiten eingezeichnet. Die in Abbildung 2-17 enthaltenen Elemente fördern folglich die Bildung von Carbiden. Weiters nehmen diese Elemente Einfluss auf die Linien des Fe-C-Systems. Eine besondere Bedeutung nimmt der eutektische Punkt ein.

Dieser hängt vom Kohlenstoffäquivalent und vom Sättigungsgrad ab. Kohlenstoffäquivalent und Sättigungsgrad sind so definiert, dass ein Kohlenstoffäquivalent von 4,26%C und ein Sättigungsgrad von 1 einer 100% eutektischen Erstarrung entspricht. Zur Berechnung des Sättigungsgrades und des Kohlenstoffäquivalents im einfachsten Fall werden nur Kohlenstoff und Silizium berücksichtigt. Für legierte Gusseisensorten werden auch Phosphor, Schwefel und andere Legierungselemente berücksichtigt [42]. Das Kohlenstoffäquivalent berechnet sich wie folgt:

$$C_E = \%C + \sum f_i * \%X_i \quad (2-25)$$

bzw. der Sättigungsgrad:

$$S_C = \frac{\%C}{4,26 + \sum f_i * \%X_i} \quad (2-26)$$

Dabei steht X_i für die Konzentration eines Legierungselements und f_i für den Wirkungskoeffizienten dieses Elements. In Tabelle 2-II sind die Einflussfaktoren der jeweiligen Elemente auf das Kohlenstoffäquivalent und den Sättigungsgrad ersichtlich.

Tabelle 2-II: Einflussfaktoren auf Sättigungsgrad und Kohlenstoffäquivalent [37, 42]

| Element | Einflussfaktor Kohlenstoffäquivalent | Einflussfaktor Sättigungsgrad |
|---------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Si | %/4 | -0,31 |
| P | %/2 | -0,33 |
| S | - | -0,40 |
| Mn | %/6 | +0,027 |
| Al | - | -0,22 |
| Cu | %/15 | -0,074 |
| Ni | %/15 | -0,053 |
| Mo | %/5 | +0,015 |
| Cr | %/5 | +0,063 |
| V | %/5 | +0,135 |

Eine Abweichung von diesen Gleichungen (2-25) und (2-26) ist auf Grund des Einflusses der Legierungselemente bei höheren Konzentrationen möglich. Ein interessanter Aspekt hierbei ist, dass sowohl Al als auch S keinen Einfluss auch das Kohlestoffäquivalent haben, jedoch eine entscheidende Rolle bei der Graphitbildung spielen (2.3.4). Die Legierungselemente beeinflussen das stabile, wie auch das metastabile System. Besonders wichtig ist hier die Beeinflussung der eutektischen Gleichgewichtstemperatur. Die Legierungselemente bewirken eine Verschiebung der eutektischen Temperatur. Dabei wird das Intervall zwischen stabiler und metastabiler eutektischer Temperatur verändert [41]. Dieser Einfluss ist in Abbildung 2-18 ersichtlich.

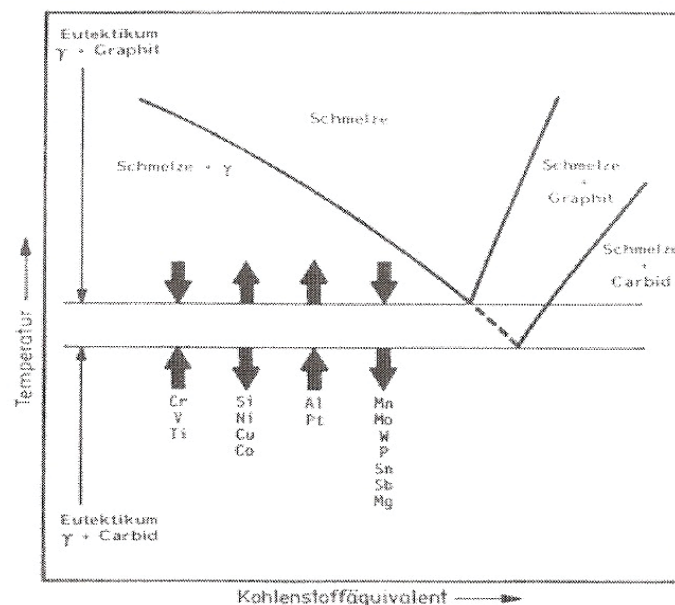


Abbildung 2-18: Verschiebung der eutektischen Temperatur auf Grund der Legierungselemente [41].

In Abbildung 2-18 ist das Verhalten im naheeutektischen Bereich dargestellt. Bei Abweichung von der eutektischen Zusammensetzung kommt es zu einer Veränderung der Steigung der in Abbildung 2-18 ersichtlichen horizontalen Linien.

2.3.3 Erstarrung des Gusseisens

Einen wesentlichen Einfluss auf die Gefügeausbildung von Gusseisenwerkstoffen hat die Kinetik des Erstarrungsvorganges. Die Erstarrung von untereutektischen Gusseisen läuft im wesentlichen in vier Schritten ab:

1. Abkühlen bis zur Liquidustemperatur
2. Ausscheiden von primären γ -Austenit
3. Anreichern der Restschmelze bis zum Erreichen der eutektischen Konzentrationen
4. Restschmelze erstarrt in der eutektischen Zusammensetzung

Die eutektische Erstarrung setzt erst bei einer Unterkühlung unter die thermodynamische Gleichgewichtstemperatur ein. Nach Erstarrungsbeginn, kommt es zu einem Anstieg der Temperatur der Schmelze (Rekaleszenz). Ist die Unterkühlung so groß, dass die Erstarrung im metastabilen Eutektikum erreicht wird bevor die Graphitbildung einsetzt, erstarrt die Schmelze im metastabilen Fe-C System und es entsteht weißes bzw. meliertes Gusseisen [44].

2.3.4 Gusseisen mit Kugelgraphit

Bei der Herstellung von Gusseisen mit Kugelgraphit wird eine Impfbehandlung durchgeführt. Das Ziel der Impfbehandlung ist die Bereitstellung von Keimen für eine heterogene Erstarrung. Von diesen Keimen beginnt das Graphitwachstum. Heute werden Siliziumträger wie SiC oder FeSi zur Impfbehandlung eingesetzt. Als wirksam gelten kristalline SiO₂-Partikel. Reines Silizium selbst verfügt über keine Keimwirkung, da erst das Vorhandensein von Ca, Al, Ba, Zr oder Sr eine Graphitbildung gefördert wird [35, 45].

Die Impfwirkung von Silizium beruht im chemischen Sinn auf einer Desoxidation der Schmelze. Bedingung dafür ist das ausreichende Vorhandensein von freiem Sauerstoff. Diese wird zum Beispiel durch einen Temperaturanstieg der Schmelze oder eine Tiegelreaktion erreicht. Diese Temperatur darf nicht zu hoch sein und die Haltezeit nicht zu lange sein, da sonst eine Reaktion mit dem in der Schmelze vorhandenen Kohlenstoff

stattfindet. Bei dieser Reaktion wird CO gebildet. Durch die Impfung mit Silizium entsteht weiters ein lokaler Effekt, welcher die Graphitbildung fördert. Dabei kommt es zu einer lokalen Übersättigung mit Silizium, welche die Kohlenstoffaktivität lokal erhöht und die Graphitbildung fördert [44, 45]. Die Wirksamkeit der Impfbehandlung wird durch die Gegenwart von Schwefel erhöht. Oxide wirken nur so lange als Keim, so lange sie ihre kristalline Oberfläche behalten. Darum soll die Impfung erst kurz vor dem Abguss erfolgen. Ein Vorimpfeffekt kam mit SiC erfolgen. Für die Bildung von Kugelgraphit werden so genannte Kugelbildner eingesetzt. Dabei handelt es sich um Metalle mit einer hohen Affinität zu Schwefel und/oder Sauerstoff (z.B. Mg oder Y). Aus diesem Grund kommt es zu einer Entkoppelung des Eutektikums. Es kommt zu einem zeitlich und örtlich entkoppelten Wachstum der eutektischen Phasen auf Grund von örtlich unterschiedlichen metallurgischen Bedingungen. Der Graphit scheidet sich dabei unabhängig vom Austenit in Form von Graphitsphäroliten aus. Die Erstarrung findet bei großen Unterkühlungen statt und es ist kein ausgeprägter Haltepunkt bei der Erstarrung erkennbar [45, 46].

Skaland [47] beschreibt, dass durch die Zugabe von Ferrosilizium und Magnesium eine Keimbildungsabfolge für die Graphitbildung entsteht. Dabei wird durch das Magnesium der im Gusseisen enthaltene Schwefel abgebunden. Erst die Bildung von MgO oder SiO₂, je nach Keimbildungsfolge, stellt die eigentliche Keimbildung dar. Durch die Bildung mit Al wird ein hexagonales Aluminiumsilikat gebildet (Abbildung 2-19). Aluminium und Schwefel haben jedoch im Gegensatz zu den anderen beteiligten Elementen keinen Einfluss auf das Kohlenstoffäquivalent (2.3.2).

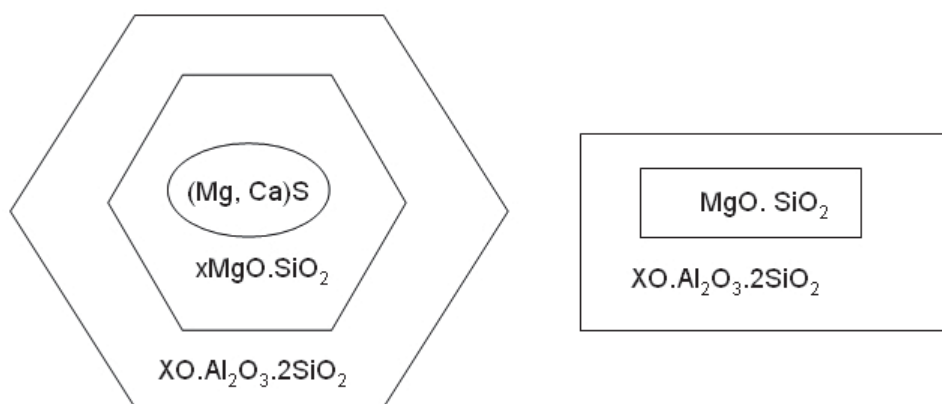


Abbildung 2-19: Keimbildungsabfolge des Graphits nach Skaland in Abhängigkeit von unterschiedlichen Ausgangskeimen [45].

In Abbildung 2-19 ist die Bildungsabfolge ersichtlich. Hierbei findet das Wachstum als eine Abfolge verschiedener Schritte statt, welche vom jeweiligen Ausgangskeim abhängen. Erst von diesem Aluminiumsilikat ausgehend kommt es zu einem Graphitwachstum. Dieses Wachstum findet von der (001) Basalfläche statt [45]. Eine weitere Theorie geht von einem Einfluss von Selten Erden Elementen auf die Kohlenstoffform aus [47]. Dabei wirken sich besonders Cer und Lanthan auf die Ausbildung des Kohlenstoffs aus. Dabei kommt es zu einer unterschiedlichen Ausbildung des Keims für die Graphitbildung. Hierbei sind drei Typen zu unterscheiden (Abbildung 2-20).

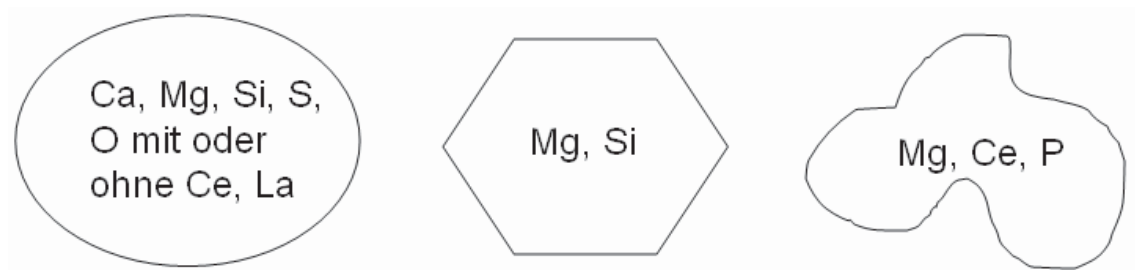


Abbildung 2-20: Keime des Graphits unter Einfluss von seltenen Erden [47].

Dabei steigert die Zugabe von Cer und Lanthan die Unterkühlung für die Graphitbildung [38].

Lux [45] beschreibt, dass die Bildung der Kugeln in der Schmelze stattfindet. Die Kugeln (fest) umgeben sich mit einer Schicht aus erstarrtem Austenit. Das weitere Wachstum der Graphitkugeln erfolgt jedoch durch Diffusion des Kohlenstoffs aus dem festen Austenit heraus.

2.4 Roses'sche Legierung

Bei der verwendeten Versuchslegierung handelt es sich um eine niedrig schmelzende Legierung mit einem Schmelzpunkt von 96°C. Die Legierung besteht aus 50% Pb, 25% Bi und 25% Sn. Diese Legierung ist unter den Namen Roses'sche Legierung oder Roses'sche Metall bekannt und wurde auf Grund des niedrigen Schmelzpunktes ausgewählt. Es gibt weitere Versuchslegierungen mit einem noch niedrigeren Schmelzpunkt, die Cadmium oder Quecksilber enthalten. Verwendet werden diese Legierung als Lötlegierung und

Modelllegierung für Versuchszwecke. Abbildung 2-21 zeigt das ternäre Phasendiagramm der Legierung [48] und deren Zusammensetzung.

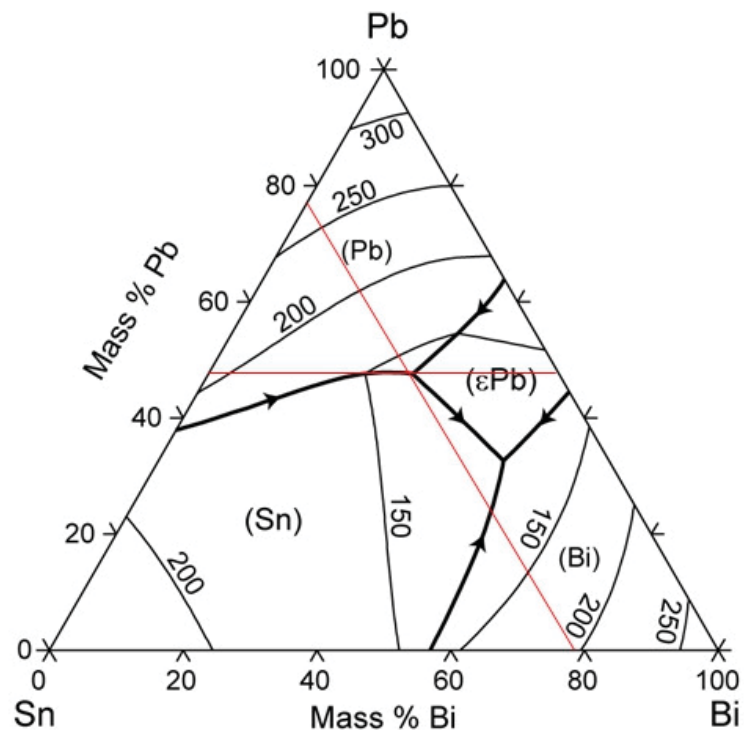


Abbildung 2-21: ternäres Phasendiagramm der Versuchslegierung [48].

Auf Grund der Ähnlichkeit dieser Legierung mit der Wood'schen Legierung, wird sie oft als Alternative zu dieser verwendet. Der Vorteil liegt in einer geringeren Toxizität, da kein Cadmium verwendet wird. In Tabelle 1-II sind die Eigenschaften der Versuchslegierung aufgelistet.

Tabelle 1-II: Eigenschaften der Roses'schen Legierung

| Schmelzpunkt [°C] | Dichte [g/cm ³] | kinematische Viskosität [m ² /s] |
|-------------------|-----------------------------|---|
| 96 | 9,320 | 0,45*10 ⁻⁶ |

3 Versuchsaufbau

3.1 Überblick über den Schleudergießversuchsstand

Die Versuchsanlage ließ sich in fünf unterschiedliche Anlagenbereiche einteilen. Diese Teilbereiche umfassten die mechanische Konstruktion, die elektrische Antriebseinheit, die Sicherheitstechnik, die verwendeten Kokillen und die Messtechnik. Die mechanische Konstruktion umfasste die Grundkonstruktion der Anlage und den mechanischen Teil des Antriebs, die elektrische Antriebseinheit die Elektrik des Antriebs und die Regelungstechnik. Ein Schema der Anlage ist in Abbildung 3-1 ersichtlich.

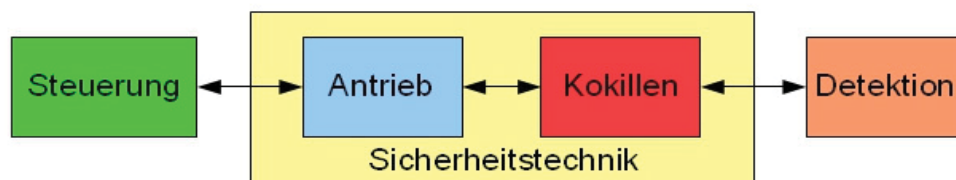


Abbildung 3-1: Schema der Anlage.

3.2 Aufbau der Versuchsanlage

3.2.1 Mechanischer Aufbau

Die angestrebte Verwendung der Anlage sowohl im horizontalen, als auch im vertikalen Schleuderguss, führte zu einer universellen Auslegung der Anlage. Um dies zu ermöglichen, musste eine Konstruktion gefunden werden, welche beiden Anforderungen entspricht. Dies wurde durch eine kippbare Konstruktion erreicht. Das Gestell sollte stabil und schwer

ausgelegt werden, um die auftretenden Massenkräfte der Schmelze und eine eventuelle Unwucht der Kokille auszugleichen.

3.2.1.1 Konstruktion des Gestells

Bei der Konstruktion des Gestells wurde von einer maximalen Unwucht von 3kg am äußersten Punkt der verwendeten Kokille (Außendurchmesser 210mm) ausgegangen. Für eine Umstellung von horizontalen in den vertikalen Schleuderguss, konnte die gesamte Konstruktion um 90° nach hinten gekippt werden. Das Gestell wurde aus 40x40x4 Formrohren aufgebaut, welche eine hohe Steifigkeit bewirkt. In Verbindung mit dem verwendeten Elektromotor führte dies zu einer hohen trägen Masse. Der fertige Aufbau des Gestells ist in Abbildung 3-2 ersichtlich.



Abbildung 3-2: Konstruktion des Gestells.

Die Einstellung des Neigungswinkels der Kokille wurde über die verwendeten Füße ermöglicht. Hier war das vorhandene Montagegewinde ausreichend, da nur eine maximale Neigung von 3° erforderlich war. Diese Füße verfügen über eine Gummiauflage, die die auftretenden Schwingungen zusätzlich dämpften.

3.2.1.2 Mechanischer Teil des Antriebs

Der mechanische Teil des Antriebs umfasste die Lagerung, den Antriebsriemen, die Riemenspannvorrichtung, die Antriebswelle und die Mitnehmerscheibe der Kokille. Die in der Versuchsanlage verwendeten Lager wurden, wie das Gestell, auf eine Unwucht von 3kg am äußeren Durchmesser der Kokille (exzentrisch einwirkende Kraft) ausgelegt. Unter dieser Annahme und der Annahme einer Drehzahl von 1200 min^{-1} und der verwendeten zweireihigen Pendelkugellager (Fa. SKF Type 2207 EKTN9, ermöglicht den Ausgleich eines Winkelversatzes der Antriebswelle), ergab sich eine für die Versuchsdurchführung ausreichende Lagerlebensdauer (siehe Anhang A). Für die Montage der Lager wurde der passende Lagerbock (Fa. SKF Type SNL 507-606) verwendet. Die Montage auf der Welle erfolgte über Spannhülsen. Diese Auslegung wurde gewählt, da dies eine schnelle, kostengünstige und einfache Montage ermöglichte. Abbildung 3-3 zeigt die Lagerung der Antriebswelle mit montierten Sicherheitsabdeckungen.

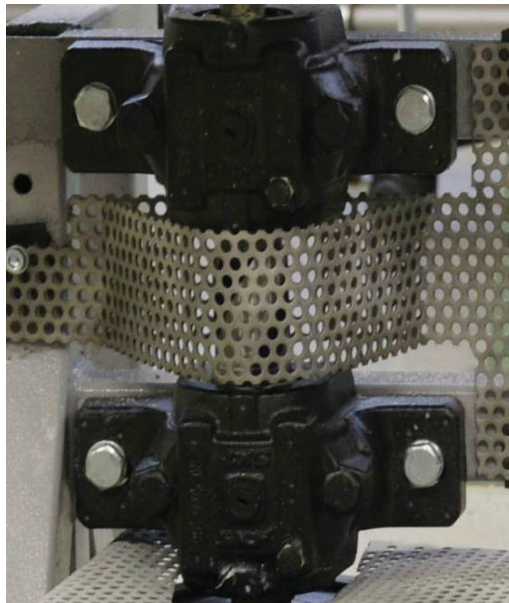


Abbildung 3-3: Lagerbock eingebauter Zustand mit Sicherheitsabdeckung.

Zur Kraftübertragung zwischen Elektromotor und Antriebswelle wurde auf einen Keilriemen zurückgegriffen. Dies ist eine einfache und kostengünstige Lösung, die für diese Versuchsanlage bei weitem ausreichte. Es wurde ein Keilriemen der Fa. Continental Type SF AVX10x1350 verwendet, welche sich aus der Berechnung der erwartenden Antriebskraft ergab. Dieser Riemen ist eine Standardtype, welche bei einem eventuellen Defekt schnell ersetzt werden kann. Es wurde für den Antrieb eine Untersetzung von 2:1 verwendet, da die Drehzahlen der in den Versuchen verwendeten Kokillen (Offene, Geschlossenen und Teller) relativ gering waren. Die Untersetzung wurde über das Verhältnis der Riemenscheibendurchmesser eingestellt. Diese Untersetzung wurde gewählt, um den Elektromotor im Bereich des maximalen Antriebsdrehmomentes zu betreiben. Dadurch kann eine schnelle Änderung der Betriebsdrehzahl erreicht werden. Für die Riemenmontage wurden Riemenscheiben mit Taperbuchsen verwendet. Diese Buchsen/Scheibenkombination verfügt über einen Kegelsitz, welcher eine einfache und schnelle Montage ermöglicht. Durch die Verwendung dieser Bauteile entfällt eine aufwendige Bearbeitung der Riemenscheiben und der Welle, da keine Passfedernuten oder Kegel verwendet werden. Hier wurde lediglich die Taperbuchse auf den vorgesehen Wellenabschnitt gesteckt und über die internen Spannschrauben gespannt. Eine Sicherung der Riemenscheiben erfolgte über eine zusätzliche Sicherungsschraube mit passender Scheibe. Der auftretende Schlupf zwischen Welle und Riemenscheibe wurde mittels Markierungen überprüft. Der Schlupf zwischen dem Riemen und den beiden Riemenscheiben wurde mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen überprüft. Es zeigte sich, dass der auftretende Schlupf auf Grund der geringen Kräfte minimal war und keinen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Abbildung 3-4 zeigt eine montierte Riemenscheibe mit Taperbuchse und Antriebsriemen.

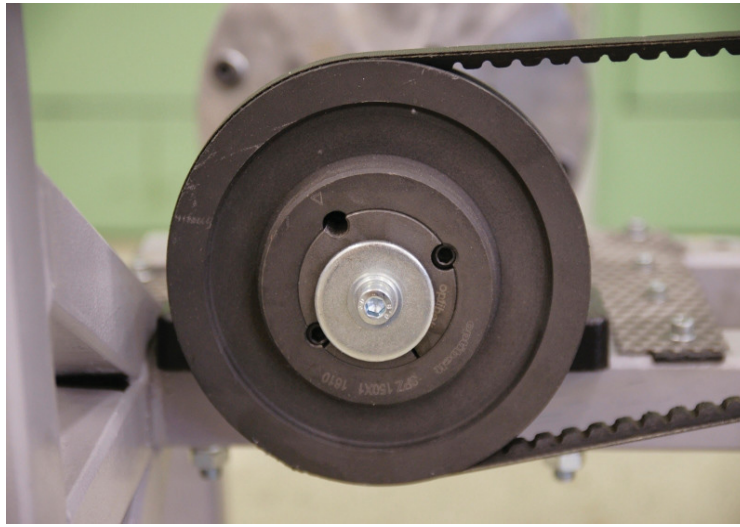


Abbildung 3-4: Riemenscheibe mit Taperbuchse.

Die Spannvorrichtung für den Riemen wurde in der Motorhalterung ausgeführt. Der verwendete Winkel (40x40x4) wurde mit zwei Gewindebohrungen für die Spannschrauben versehen und direkt am Gestell angeschweißt. Die Einstellung der Spannkraft erfolgte über die beiden Spannschrauben, welche auf den Montageflansch des Motors drückten. Die Welle wies auf der Antriebsseite die Aufnahme für die Taperbuchse, welcher ein auf den Innendurchmesser der Taperbuchse gedrehter Abschnitt ist, auf. Die Lageraufnahme wurde auf Grund der gewählten Lager als einfache Wellenschulter ausgeführt. Kokillenseitig wurde zur Spannung der Mitnehmerscheibe ein 1:10 Kegel verwendet. Dies ergab sich aus einer Abschätzung der zu erwartenden Kräfte an der Aufnahme. Der 1:10 Kegel erfüllt bereits das Kriterium der Selbsthemmung, was zu einer weiteren Steigerung der Betriebssicherheit in diesem Bereich führt. Die Mitnehmerscheibe stellt das Verbindungsstück zwischen Antrieb und Kokille dar. Ihre Aufgabe ist die Kraftübertragung von der Antriebswelle zur Kokille. Diese Scheibe wurde aus Aluminium ausgeführt, da die thermische Belastung gering war. Die Kombination mit einer Stahlwelle und einer Aluminiumscheibe führt zu einer erhöhten Reibung an der Kontaktfläche, was die Kraftübertragung verbessert. Zur Bestimmung des mechanischen Schlupfs wurde eine Markierung an Riemenscheibe und der Welle angebracht. Die Überprüfung des mechanischen Schlupfs (Kapitel 3.4.1) ergab, dass dieser zu vernachlässigen war. Bei der Mitnehmerscheibe wurde durch einen Absatz die Zentrierung der Kokille durchgeführt. In Abbildung 3-5 ist die Mitnehmerscheibe zu sehen.



Abbildung 3-5: Mitnehmerscheibe.

Die Mitnehmerscheibe wurde zur Steigerung des Kontrastes bei den späteren Video- und Fotoaufnahme, matt schwarz lackiert. Dies ermöglichte eine bessere Erkennbarkeit der Schmelze/Flüssigkeit in der Kokille und sollte die Reflexion des einfallenden Lichtes vermindern. Abbildung 3-6 zeigt die Antriebswelle in eingebauten Zustand.

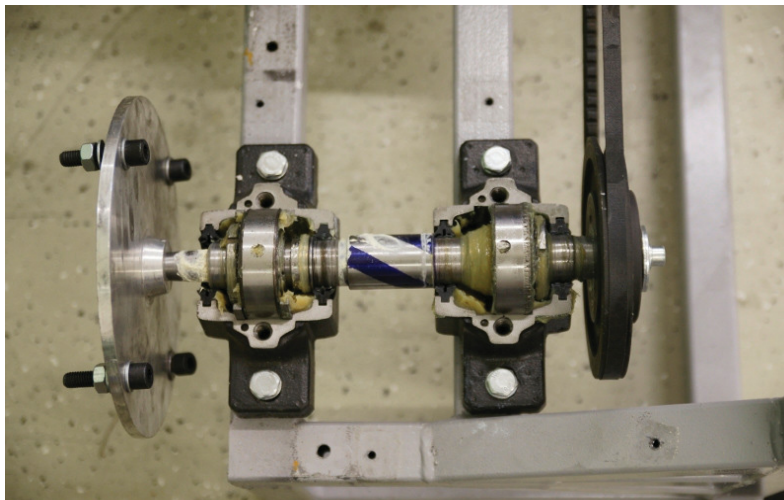


Abbildung 3-6: Antriebswelle.

Auf der in Abbildung 3-6 gezeigten Welle wurden bereits die Mitnehmerscheibe und die Riemenscheibe montiert.

3.2.2 Elektrischer Aufbau

3.2.2.1 Elektromotor

Es wurde ein Elektromotor des Typs Lenze-WEG A112M-08 verwendet (Abbildung 3-7). Dieser wies eine Polpaarzahl von 8 und eine Anschlussleistung von 1,5 kW auf. Die Nenndrehzahl des Motors lag bei 720min^{-1} . Dieser Motor verfügte über ein hohes Anfahrmoment, was ein schnelles Beschleunigen der Kokille ermöglichte. Die Befestigung des Motors erfolgte über einen Montageflansch.



Abbildung 3-7: Elektromotor.

3.2.2.2 Schaltschrank

Der Schaltschrank umfasste den Frequenzumrichter (Fa. Lenze, Type 8400 Basic Line), den Motorschutzschalter, einen Hauptschalter, ein Potentiometer zur Drehzahlsteuerung, einen Hauptschütz, Anschlusselemente und Statusanzeigen. Der verwendete Frequenzumrichter verfügte über eine Nennleistung von 1,6kW. Weiters war eine freie Programmierung möglich. In Abbildung 3-8 ist der Schaltschrank im geöffneten Zustand mit allen Bauelementen zu sehen.

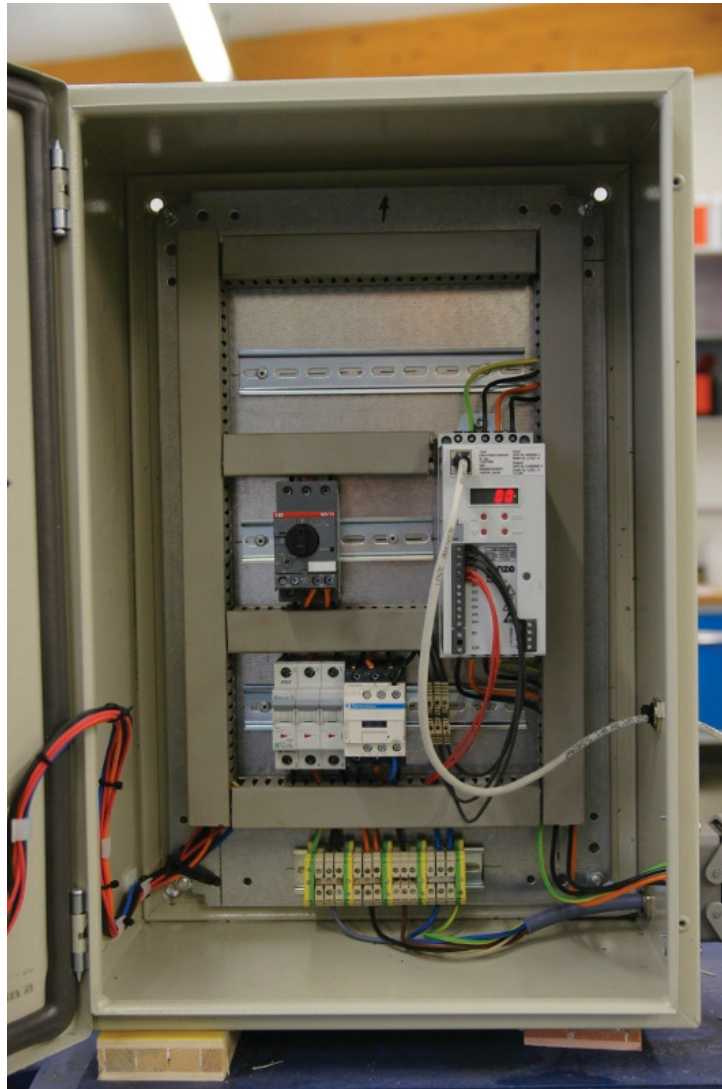


Abbildung 3-8: Schaltschrank geöffnet.

Der Frequenzumrichter hatte einen internen Motorschutz eingebaut, jedoch wurde ein externer Motorschutz zur weiteren Sicherheitssteigerung verbaut. In Abbildung 3-9 ist das Schaltschema der Anlage ersichtlich.

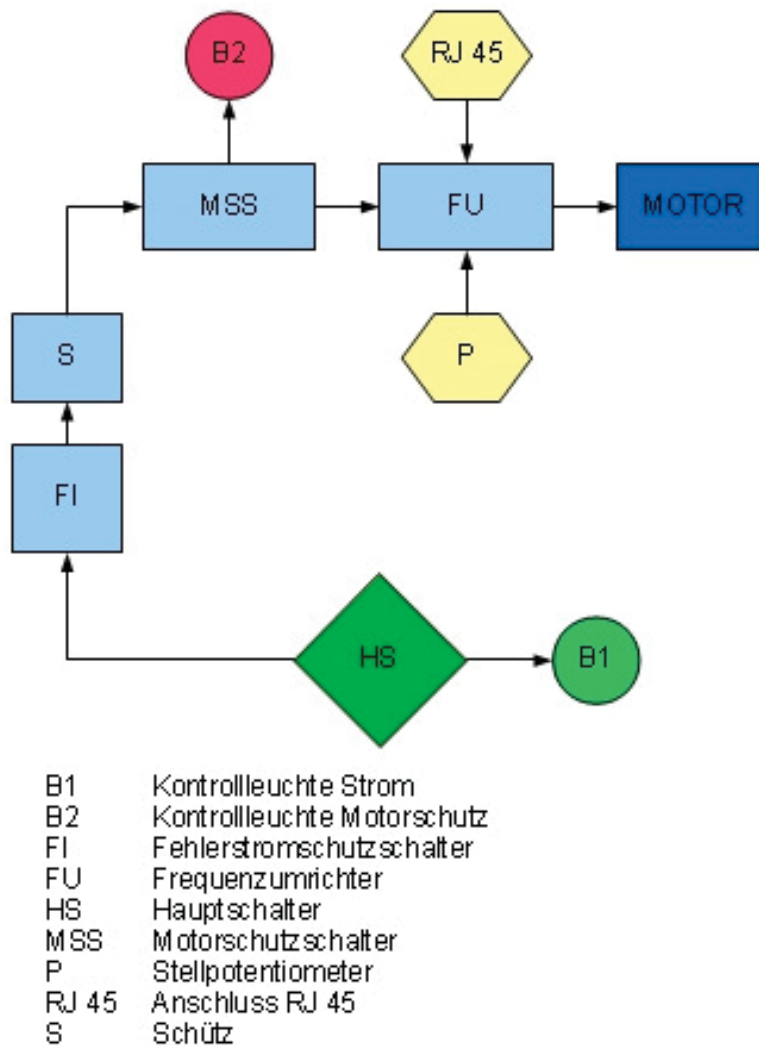


Abbildung 3-9: Schaltschema der Anlage.

Die Drehzahlregelung der Anlage konnte über das im Schaltschema ersichtliche Potentiometer oder über eine Computersteuerung erfolgen. Die Ansteuerung für das Stellpotentiometer erfolgte über einen Analogen 12V-Anschluss an den Frequenzumrichter. Weiters wurde ein Taster zur Freigabe des FU's verbaut. Um eine Freigabe zu erreichen, musste ein Triggersignal unterbrochen und wieder geschlossen werden.

3.2.2.3 Computersteuerung

Bei der Computersteuerung erfolgte die Anbindung an einen PC mittels einer seriellen Verbindung. Mit dieser Steuerung konnten betriebsrelevante Parameter wie Hochlaufzeit, Abbremszeit und Solldrehzahl eingestellt werden. So war die Solldrehzahl des Motors in einem Bereich von bis +224% zur Bezugsdrehzahl (Nenn Drehzahl) des Motors einstellbar. Dies entsprach bei dem verwendeten Motor einer Drehzahl von 1612 min^{-1} . Die Bestimmung der tatsächlichen Drehzahl der Kokille erfolgte mittels einer Stoppuhr (Nenn Drehzahl bei 60 min^{-1}) und mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen (im Bereich von $400\text{-}800 \text{ min}^{-1}$). Daraus wurde der elektrische vorhandene Schlupf für unterschiedlichen Drehzahlen errechnet (Abbildung 3-10).

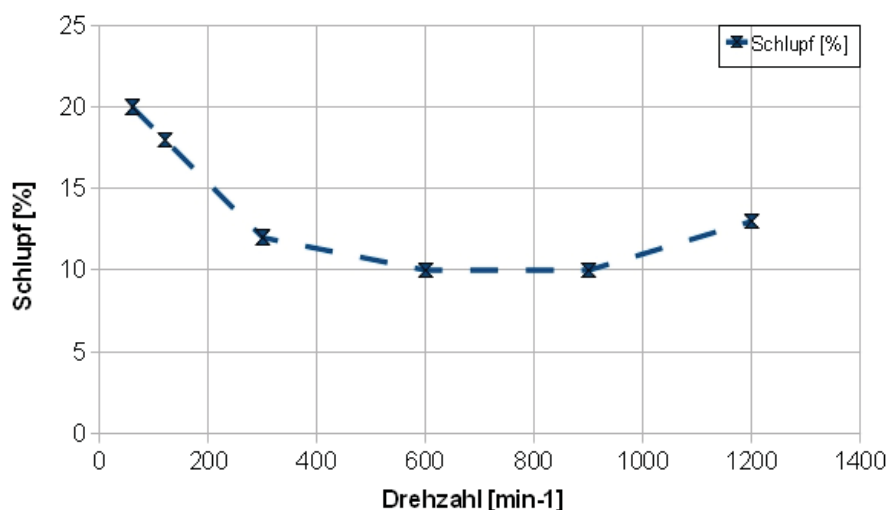


Abbildung 3-10: Schlupf bei unterschiedlichen Drehzahlen.

In der weiteren Versuchsauswertung (Kapitel 4) wurde die durch den Schlupf korrigierte Drehzahl verwendet.

3.2.3 Sicherheitstechnik

Um ein ungewolltes Eindringen von Teilen in die rotierenden Anlagenbereiche zu verhindern, wurden Abdeckungen verbaut (Abbildung 3-11). Hierbei wurden sämtliche rotierende Teile und der Antriebsriemen abgedeckt.

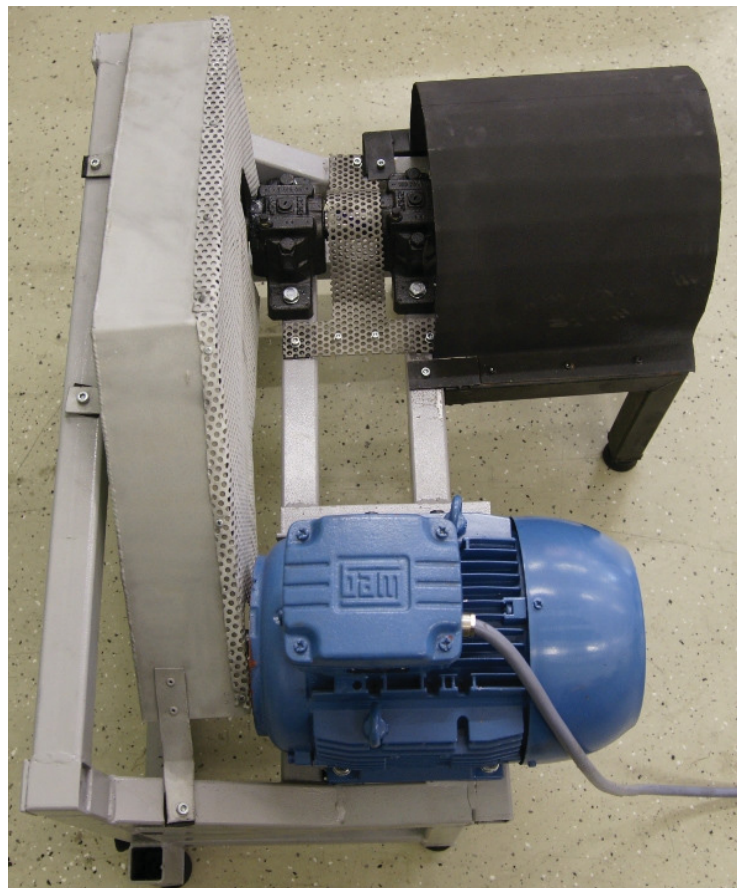


Abbildung 3-11: Anlage mit Abdeckungen.

Die Kokille für die Versuche zur Bestimmung der kritischen Drehzahl wurde mit einem Verbundschauglas versehen. Dieser Verbund bestand aus einer Borsilikatscheibe innen und einer Polycarbonatscheibe außen. Es wurden zwei Scheiben verwendet, da die Borsilikatscheibe schlecht benetzt wird und die Polycarbonatscheibe eine hohe

Bruchsicherheit aufwies. Für die Versuche im vertikalen Schleuderguss ist ein Abdeckkasten angefertigt worden, welcher ein Herausschleudern der Schmelze verhinderte (Abbildung 3-12).

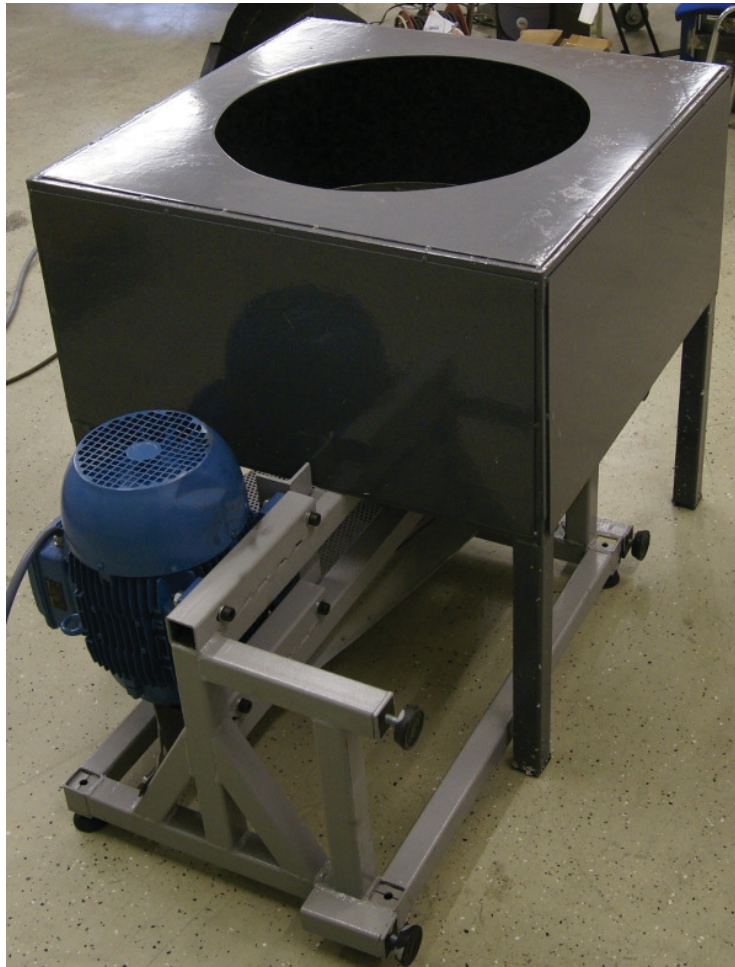


Abbildung 3-12: Anlage mit Schutzkasten.

Der elektrische Teil der Sicherheitstechnik umfasst einen Motorschutzschalter, einen Motorstrombegrenzer und einen Notastaster.

3.3 Verwendete Kokillen

3.3.1 Oberfläche der Kokillen

Es wurden eine geschlossene Kokille mit Schauglas, eine offene Kokille und ein Teller verwendet. Die beiden Kokillen waren jeweils ein Teilstück einer Kokille aus der Produktion von Rohren. Sie wiesen einem Innendurchmesser von 170mm auf und sind aus einem Warmarbeitsstahl gefertigt. Alle Versuchsobjekte verfügten über eine maschinell aufgebrachte Hämmerung. Diese bedeckte die Innenseite der Kokille und eine Seite des Tellers (Oberseite). Diese Hämmerung wies eine Tiefe von 0,3-0,5mm bei einem Durchmesser von 3mm auf (Abbildung 3-13). Diese Tiefe der Hämmerung entspricht dem Faktor k in den Formeln 2-19 bis 2-23.



Abbildung 3-13: Hämmerung der Kokillen.

Die Montage der Kokillen und des Tellers erfolgte über vier Schrauben an der Mitnehmerscheibe. Die beiden Kokillen wurden in den Versuchen zum horizontalen Schleuderguss verwendet. Die Temperaturbestimmung erfolgte mittels eines Infrarothandtemperaturmessgerätes (Fa. Raytek, Type Raynger MX).

3.3.2 Geschlossene Kokille

Das Verschließen der Kokille sollte ein Herausspritzen der Flüssigkeit verhindern. Weiters wurde die Kokille an der Vorderseite mittels eines O-Ringes abgedichtet. Die Abdichtung der Kokille zur Mitnehmerscheibe erfolgte mittels eines Teflonbandes. Die geschlossene Kokille (Abbildung 3-14) wurde an der Außenfläche abgedreht um eine Reduktion der bewegten Masse zu erreichen. Die Abdichtung erfolgte mittels eines O-Ringes an der Vorderseite (Seite zum Schauglas) und mittels Dichtband an der Hinterseite. Die Montage des Schauglases an der Kokille erfolgte über sechs Schrauben an der Stirnseite der Kokille.

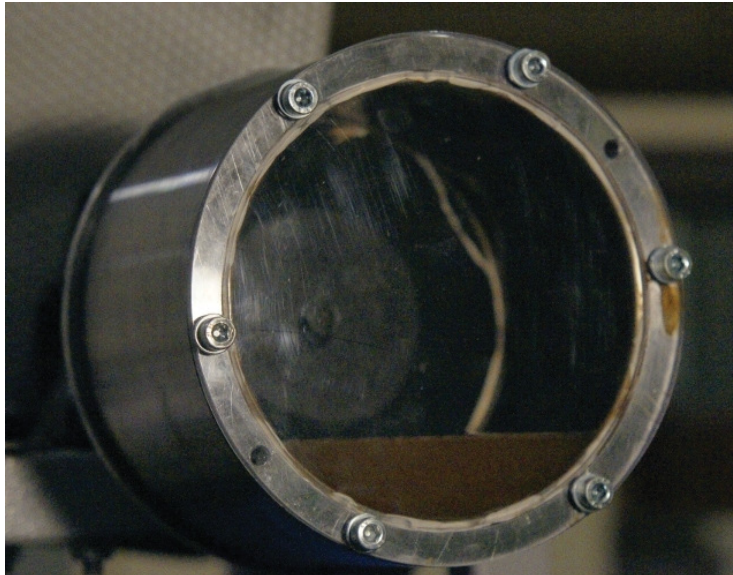


Abbildung 3-14: geschlossene Kokille.

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur der Kokille wurde eine Graphitschicht (bekannter Emissionsgrad) aufgetragen. Die Kokille wurde mittels Ultraschall gereinigt, da sich in der Hämmerung starke Ablagerungen befanden.

3.3.3 Offene Kokille

Diese Kokille wurde bei den Versuchen zum Aufgießen auf eine bewegte Oberfläche verwendet. Die Kokille hatte eine Länge von 230mm. Zur Reduktion der bewegten Massen wurde ein Teil des Mantels abgedreht. Zur Bestimmung der Kokillentemperatur wurde die Außenseite schwarz lackiert (Abbildung 3-15). Diese Kokille wurde ebenfalls mittels Ultraschallbad gereinigt.



Abbildung 3-15: offene Kokille mit schwarzer Lackierung zur Temperaturmessung.

3.3.4 Rotierender Teller

Der Teller (Abbildung 3-16) wurde in den Versuchen für den vertikalen Schleuderguss verwendet. Hier erfolgte die Montage über ein angeschweißtes Stück einer in den anderen Versuchen verwendeten Kokille. Weiters wurde außen ein Ring angebracht, welcher die auftreffende Schmelze vor einem Herausspritzen abhalten sollte. Dieser Teller bestand nicht wie die beiden Kokillen aus einem Warmarbeitsstahl, sondern aus einem gewöhnlichen Baustahl. Der Durchmesser des Tellers betrug 500mm.



Abbildung 3-16: Teller mit Hämmerung.

Es wurde ein Metallring (Höhe 50mm, Dicke 5mm) zum Auffangen der Schmelze an das Teller angebracht. Ein Spalt zwischen Teller und Außenring war durch die Fertigung bedingt. Durch das Verschweißen des Tellers mit dem Ring konnte der Spalt gefüllt und für Erreichen einer glatten Oberfläche abgeschliffen werden. Dies ist in Abbildung 3-16 an der blanken Oberfläche im Außenbereich des Tellers zu sehen. Dieser Bereich war für die Versuche nicht relevant, da hier nur das Gussmaterial aufgefangen wurde. Weiters musste für einen ruhigen Lauf eine Wuchtung des Tellers durchgeführt werden. Dafür wurde der Teller auf der

Mitnehmerscheibe montiert und die Anlage in die Stellung für den horizontalen Schleuderguss gekippt und in Rotation versetzt. Auf Grund des exzentrischen Schwerpunktes blieb der Teller in einer stabilen Lage (Schwerpunkt im unteren Totpunkt) stehen. Anschließend wurde auf der gegenüberliegenden Seite des Tellers Schweißpunkte angebracht und der Teller wieder in Bewegung versetzt. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt, bis der Teller beim erneuten Drehen in zufälligen Lagen stehen blieb. Mit dieser Methode konnte ein Rundlauf erreicht werden, welcher für die durchgeführten Versuche ausreicht (keine Vibrationen bis 1200 min^{-1}).

3.4 Experimentelle Methoden

3.4.1 Allgemein

Die Versuchsaufzeichnung erfolgte mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera (Fa. Casio Type EXILIM EX-F1) und einer digitalen Spiegelreflexkamera (DSLR der Fa. Sony Type ALPHA 700 mit Objektiv der Fa. Sigma Type 70-200 2.8 EX DG APO HSM). Bei den Versuchen konnte eine Bildwiederholrate von 600 oder 1200 fps bei der Hochgeschwindigkeitskamera verwendet werden. Die Aufzeichnungsrate von 600 fps wurde bei den Versuchen mit der offenen, der geschlossenen Kokille und teilweise beim rotierenden Teller verwendet, die Einstellung von 1200 fps nur beim rotierenden Teller. Diese Einstellung erlaubte die Aufzeichnung der Versuche ohne die Verwendung eines Filters (keine Überbelichtungen auf Grund der Strahlung des flüssigen Gusseisens). Zusätzlich zu den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden bei den Versuchen mit der geschlossenen Kokille Aufnahmen mittels der DSLR aufgenommen. Auf Grund der fehlenden Möglichkeit der gleichzeitigen Aufzeichnung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Bildaufzeichnung der Hochgeschwindigkeitskamera musste dies durchgeführt werden.

Die Auswertung erfolgte mittels der aufgezeichneten Aufnahmen. Dies wurde mittels eines Bildbearbeitungsprogrammes (GIMP) durchgeführt und es konnten die korrekten geometrischen Verhältnisse auf den Aufnahmen wieder hergestellt werden. Dies musste durchgeführt werden, da auf Grund von Reflektionen eine Aufnahme direkt von Vorne nicht möglich war. Es wurden bei der Bildbearbeitung eine Kontrast- und Helligkeitsanpassung durchgeführt. Diese diente lediglich der besseren Erkennbarkeit der Aufnahmen. Weiters

erlaubte dieses Programm eine Bestimmung von Abständen und Winkeln. Voraussetzung für eine korrekte Ermittlung dieser, ist jedoch wie zuvor beschrieben, eine korrekte geometrische Darstellung. Die Bestimmung des Füllvolumens in der geschlossenen Kokille erfolgte bei Wasser über die Zugabe mittels eines Messglases. Bei der Roses'schen Legierung (50%Bi, 25%Pb und 25%Sn) wurde das Einsatzgewicht gemessen und daraus das Füllvolumen errechnet und aus den Füllvolumen die Schichthöhe. Die Auswertung erfolgte mittels der von der Steuerung der Versuchsanlage ausgegebenen Drehzahlen. Dadurch kam es sowohl bei der Verwendung von Wasser, wie auch bei der Metalllegierung zu einem Fehler in der Schichtdicke. Dieser Fehler lag im Bereich von +- 0,1mm. Weiters wurde ein Gusseisen (GJS) verwendet. Zur Bestimmung des in Kapitel 3.2.1.2 beschriebenen mechanischen Schlupfs wurden Markierungen an der Taperbuchse angebracht. Da sich diese Markierungen nach mehrmaligen Abbremsen und beschleunigen nicht verschoben, konnte der Schlupf an dieser Stelle Vernachlässigt werden. Der Schlupf zwischen Riemen und Riemenscheibe wurde mittels Markierungen und Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmt. Der hier auftretende mechanische Schlupf konnte ebenfalls vernachlässigt werden. Der in Kapitel 3.2.2.3 beschriebene elektrische Schlupf wurde in der weiteren Auswertung nicht vernachlässigt.

Zur Bestimmung der Streuung von Messwerten wurde die Standardabweichung verwendet. Die Standardabweichung für eine Zufallsvariable X (welche für die Messwerte steht), ist definiert als die positive Quadratwurzel der Varianz der Zufallsvariablen. Die Varianz ergibt sich:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \quad (3-1)$$

Daraus ergibt sich für die Standardabweichung:

$$\delta_x = \sqrt{s_x} \quad (3-2)$$

Es wurden für jeden Messwert jeweils 8 Wiederholungen durchgeführt. Aus diesen 8 Werten wurden die zu berechneten Werte ermittelt. Aus diesen ermittelten Werten wurde die Standardabweichung bestimmt.

3.4.2 Versuche mit der geschlossenen Kokille

3.4.2.1 Allgemein

Hier wurde die in Kapitel 3.3.2 beschriebene Kokille verwendet. Als Einsatzstoffe wurde hier mittels Tinte eingefärbtes Wasser und die Bi-Pb-Sn Metalllegierung (Kapitel 2.4) verwendet. Die Einfärbung des Wassers diente zur besseren Erkennbarkeit des Wassers auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und den Fotos. Die Metalllegierung wurde im festen Zustand in die Kokille eingesetzt und anschließend mittels Heißluft aufgeschmolzen (Abbildung 3-17).

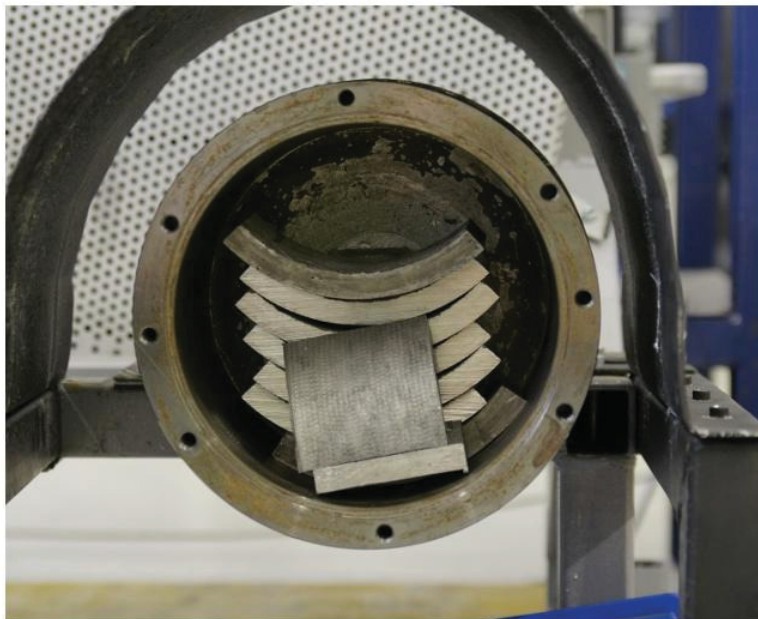


Abbildung 3-17: Mit der Versuchslegierung befüllte Kokille.

Die Versuchsanlage wurde auf einem Tisch bzw. am Boden des Gießereilaboratoriums aufgebaut (Abbildung 3-18).



Abbildung 3-18: Versuchsaufbau im horizontalen Schleuderguss.

Die Aufstellung der Kokille am Boden wurde nur bei der Metalllegierung durchgeführt, da auf Grund der während der Versuche auftretenden Schwingungen eine Durchführung der Versuche auf dem Tisch nicht möglich war.

3.4.2.2 Mitnahme im laminaren Bereich

Für die Auswertung der Versuche zur Mitnahme der Schmelze in laminaren Bereich wurde die horizontale Teilungsebene als Bezugsebene gewählt. Von dieser Ebene ausgehend wurde der Winkel der Schmelzenfront gemessen. Auf Grund dessen, dass die Keilspitze entgegen des Uhrzeigersinnes wanderte, wurde die Winkelbestimmung wie in Abbildung 3-19 dargestellt gewählt.

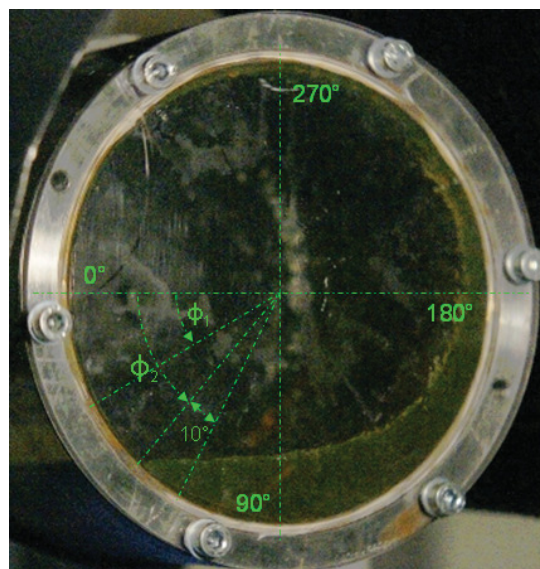


Abbildung 3-19: Bildung des Fluidkeils mit Winkelbestimmung.

In Abbildung 3-19 ist die Veränderung des Winkels von ϕ_1 zu ϕ_2 ersichtlich. Das Schema zur Bestimmung der Schichtdicke ist in Abbildung 3-20 dargestellt.

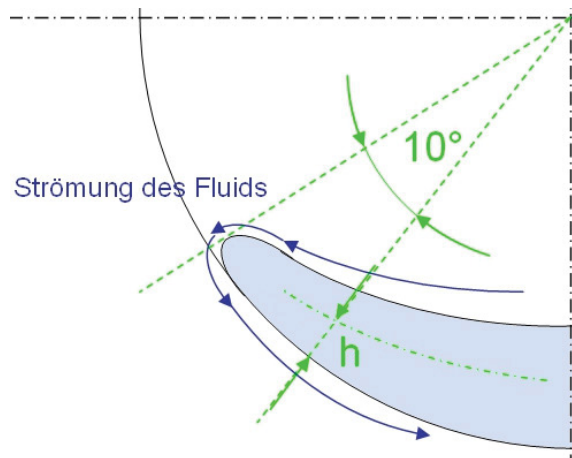


Abbildung 3-20: Bildung des Fluidkeils mit Bestimmung der durchströmten Schichtdicke.

Der Winkel von 10° , welcher in den Abbildungen 3-19 und 3-20 ersichtlich ist, ergab sich dadurch, dass sich in diesem Bereich eine stabile Oberfläche ausbildete. In Abbildung 3-20 ist auch ersichtlich, dass die Richtung der Strömung an der Vorderkante des Keils umkehrt. Dies ist dadurch bedingt, dass das Fluid an der Oberseite zurückströmt und von der Kokillenwand mitgenommen wird. Auf Grund dieses Verhaltens ergibt sich eine neutrale Zone in der Mitte des Keils. Der Abstand dieser Zone zur Kokillenwand entspricht dem Faktor h in den Gleichungen 2-18 bis 2-23. Einen Einfluss auf den ermittelten Rauigkeitswert hat auch die Veränderung der Schichtdicke h .

3.4.2.3 Kritische Umfangsgeschwindigkeit

Versuche zur Bestimmung einer kritischen Umfangsgeschwindigkeit wurden durchgeführt. Bei Erreichen dieser Geschwindigkeit von der innersten Schicht des Fluids kam es zu einer Überschreitung des oberen Totpunktes (Kräftegleichgewicht in diesem Punkt, Erfüllung der Loopingbedingung, Kapitel 2.2.1). Diese Versuche wurden mit unterschiedlichen Füllständen und den sich daraus ergebenden unterschiedlichen Schichtdicken durchgeführt. Dabei kam es auf Grund der variierenden Schichtdicken zu unterschiedlichen kritischen Umfangsgeschwindigkeiten (kritische Drehzahlen) unter Berücksichtigung der

unterschiedlichen Viskosität und Dichte der Medien. Die Bestimmung dieser kritischen Drehzahl erfolgte unter einer langsamen Beschleunigung der Kokille um möglichst geringe Turbulenzen in der Flüssigkeit zu erzeugen. Nach einer ersten Ermittlung der kritischen Drehzahl, wurde die endgültige Bestimmung mit einer nochmals geringeren Kokillenbeschleunigung durchgeführt. In Abbildung 3-21 ist die Hochfahrkurve zur Bestimmung der kritischen Drehzahl ersichtlich.

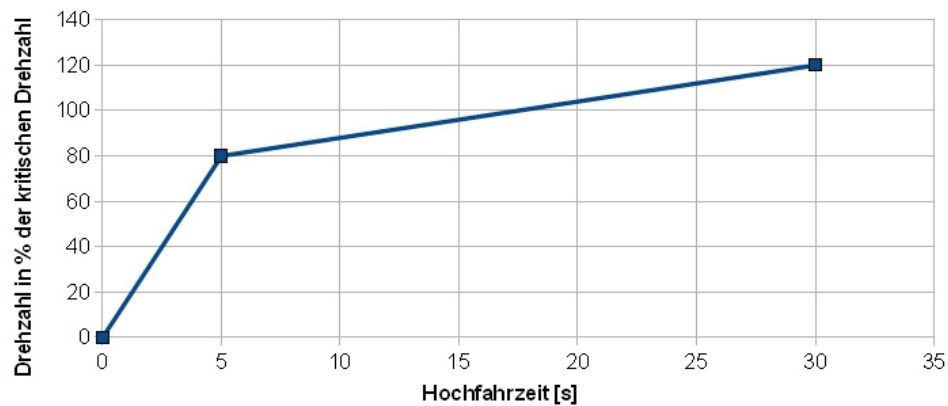


Abbildung 3-21: Hochfahrkurve zur Bestimmung der kritischen Drehzahl.

Dieses Hochfahren in zwei Schritten diente zur Stabilisierung der Strömung in der Kokille. Eine Bestimmung dieser Drehzahl war bei einer Verzögerung der Kokille nicht möglich, da sich Instabilitäten im Flüssigkeitsring bildeten und so eine genaue Beurteilung nicht möglich war.

3.4.3 Versuche mit der offenen Kokille

Bei diesen Versuchen wurde das Auftreffen der Schmelze auf die bewegte Oberfläche der Kokille beobachtet. Als Versuchsmedium diente die in Kapitel 2.4 beschriebene Metalllegierung (Roses'sche Legierung). Die Kokille wurde für diese Versuche um 3° nach hinten geneigt, was den tatsächlichen Betriebsparametern beim Schleuderguss von Rohren entspricht. Hier wurde ein mit Bornitrid beschichteter und höhenverstellbarer Einguss verwendet (Abbildung 3-22). Das Aufschmelzen der Metalllegierung erfolgte in einer mit einer Schlichte versehenen Schöpfkelle. Die Aufzeichnung der Versuche erfolgte mittels der Hochgeschwindigkeitskamera.



Abbildung 3-22: schräger Einguss für die offene Kokille.

Vor jedem Versuch mit der Metallschmelze wurde die Kokille mittels Heißluft erwärmt und die Temperatur der Schmelze gemessen. Die Auswertung der Versuche bei der offenen

Kokille erfolgte nach dem in Abbildung 3-23 ersichtlichen Schema. Dabei wird der Abstand der Vorderkante der Schmelze vom Auftreffpunkt auf die Kokille bestimmt.

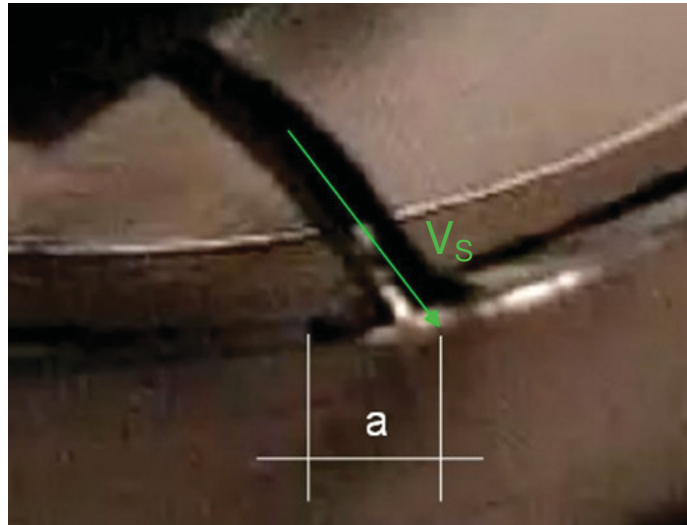


Abbildung 3-23: Messung des Abstandes der Schmelzenfront zum Auftreffpunkt.

3.4.4 Versuche mit dem rotierenden Teller

Ziel dieser Versuche war die Beobachtung des Auftreffens der Schmelze auf ein rotierendes Teller (vertikaler Schleuderguss). Dafür musste die Anlage auf die Konfiguration für vertikalen Schleuderguss umgebaut werden. Die Aufzeichnung erfolgte über die Hochgeschwindigkeitskamera mit Bildwiederholraten von 600 und 1200 fps. Als Einsatzmaterial diente ein Gusseisen, welcher von den Tiroler Röhrenwerken zur Verfügung gestellt wurde.

Das Vormaterial (GJS) wurde in einem Induktionsofen erschmolzen. Nach dem Schmelzen wurde im freien Fall (Fallhöhe ca. 400mm) auf den rotierende Teller gegossen. Nach dem Auftreffen der Schmelze auf den Teller bildete sich eine Schmelzenfront, welche teilweise entgegen der Rotationsrichtung des Tellers strömte. Diese Schmelzenfront diente als Grundlage für die Auswertung (Kapitel 4.3). Weiters wurden zwei Versuche mit einer Aufgabe der Schmelze auf den Drehmittelpunkt des Tellers durchgeführt. Während der Versuche zeigte sich, dass entgegen den anderen Versuchen hier eine Aufzeichnung mit 1200 fps bessere Resultate lieferte als mit 600 fps. Der Grund für die Verwendung der Aufzeichnungsfrequenz von 1200 fps lag in der starken Strahlung der Schmelze (bewirkte

bei 600 fps eine Überbelichtung). Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte durch eine Bestimmung des Abstandes der Vorderkante und einer seitlichen Kante der Schmelze am Auftreffpunkt auf den Teller. Dafür wurden aus den aufgezeichneten Hochgeschwindigkeitsaufnahmen einzelne Bilder ausgewertet. Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte wie in Abbildung 3-24 ersichtlich.

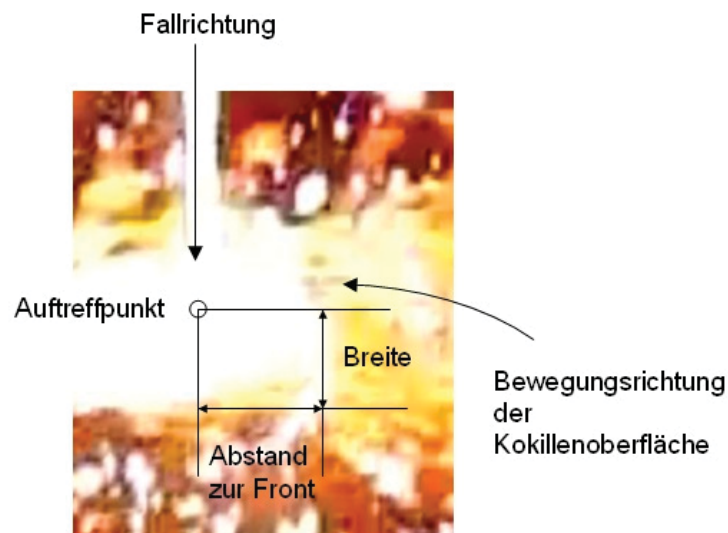


Abbildung 3-24: Messung des Abstandes der Vorderkante und einer seitlichen Kante am Auftreffpunkt auf den Teller.

Hier diente eine Näherung des Auftreffpunktes der Schmelze als Ausgangspunkt für die Auswertung. Als Referenz zur Bestimmung des Abstandes der Schmelzenfront wurde der Auffangring des Tellers, da dieser in jeder Aufnahme sichtbar war, verwendet. Da dessen Abmessungen bekannt war, konnte dies als Bezug verwendet werden. Daraus folgend konnten die Abstände der Schmelzenfront und einer seitlichen Kante berechnet werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Versuche mit der geschlossenen Kokillen

4.1.1 Mitnahme der Schmelze im laminaren Bereich

Die Versuche in der geschlossenen Kokille dienten zur Bestimmung des Reibwerts im laminaren Bereich. Bei diesen Versuchen wurde die Kokille langsam auf eine bestimmte Drehzahl beschleunigt und ca. 10s auf dieser Drehzahl (z.B. 100 min^{-1}) gehalten. Dies hat eine Stabilisierung der Strömung im Fluid zur Folge. Erst nach dieser Stabilisierung wurden die Aufnahmen zur Bestimmung des Winkels ausgelöst. Bei der Verwendung der Metalllegierung kam es zur Bildung eines erstarrten Ringes am Schauglas, wodurch eine Aufnahme nicht möglich war. Dies hatte zur Folge, dass diese Versuche nur mit eingefärbtem Wasser durchgeführt werden konnten. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 4-I dargestellt.

Tabelle 4-I: Versuchsparameter Wasser.

| <i>Einfüllmenge [ml]</i> | <i>Theoretische Schichtdicke [mm]</i> | <i>Drehzahlbereich [min^{-1}]</i> |
|--------------------------|---------------------------------------|---|
| <i>260⁺¹</i> | <i>3,8^{+0,2}</i> | <i>0-450</i> |
| <i>300⁺¹</i> | <i>4,5^{+0,2}</i> | <i>0-450</i> |
| <i>350⁺¹</i> | <i>5,2^{+0,2}</i> | <i>0-500</i> |
| <i>400⁺¹</i> | <i>6^{+0,2}</i> | <i>0-600</i> |
| <i>450⁺¹</i> | <i>6,7^{+0,2}</i> | <i>0-700</i> |
| <i>500⁺¹</i> | <i>7,5^{+0,2}</i> | <i>0-750</i> |
| <i>900⁺¹</i> | <i>14^{+0,2}</i> | <i>0-800</i> |

Die in Tabelle 4-1 angeführte theoretische Schichtdicke entspricht der Schichtdicke, welche sich bei einer vollständigen Ausbildung des Fluidrings ergeben würde. Diese Schichtdicke wird auch in den Abbildungen 4-1 und 4-2 verwendet. Die Auswertung der Ergebnisse aus Kapitel 3.4.2.2 zeigen eine Verschiebung der Vorderkante des Keils in Abhängigkeit der Schichtdicke des Fluids und von der Umfangsgeschwindigkeit der Kokille. Dies lässt sich anhand der unterschiedlichen Reynoldszahlen und daher von der auftretenden Turbulenz erklären. Die Veränderung des Keils ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Hierbei stellt der ersichtliche Fehlerbalken die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Standardabweichung dar.

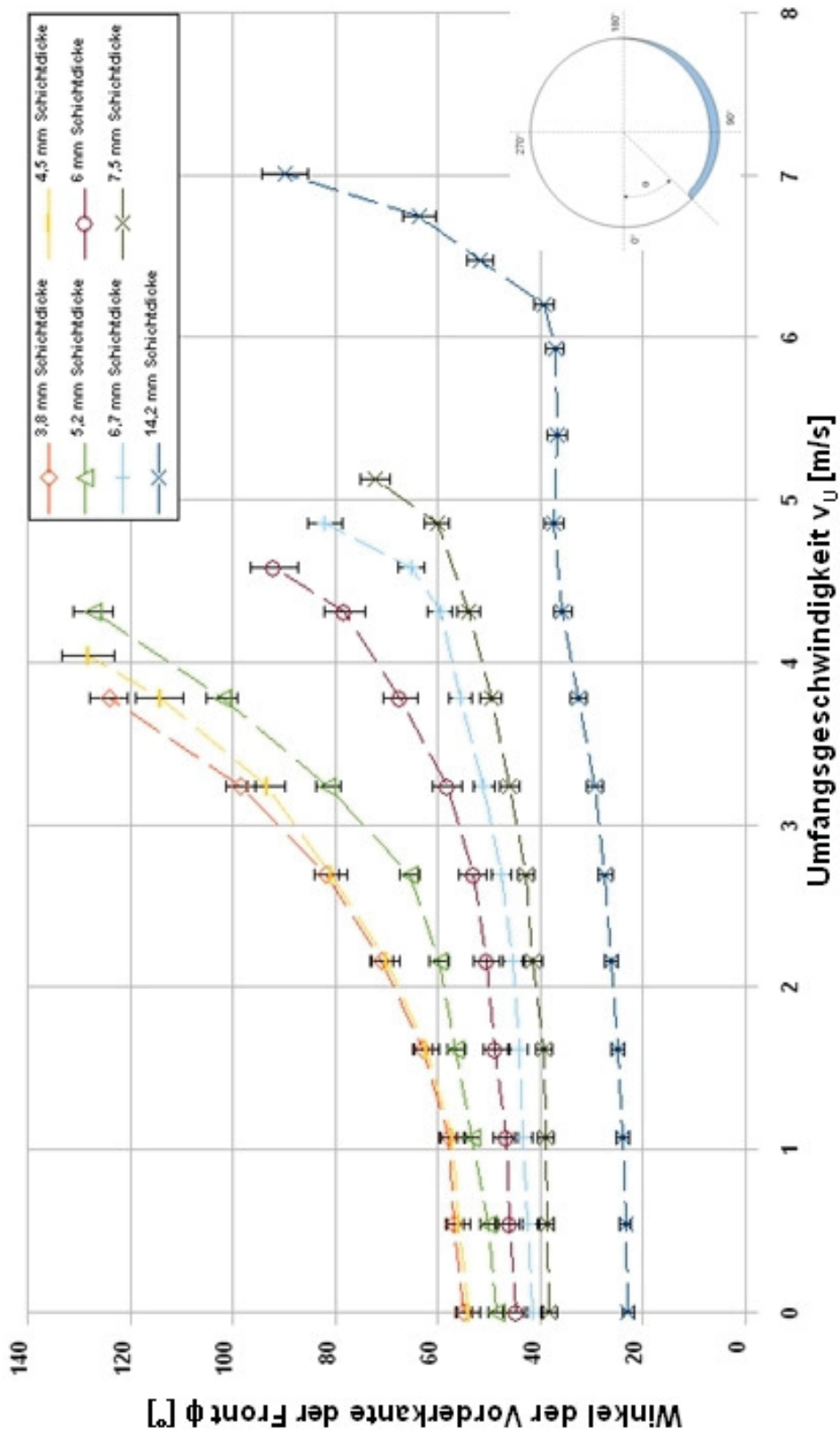


Abbildung 4-1: Abhängigkeit des Winkels von Umfangsgeschwindigkeit und Schichtdicke.

Wie der Abbildung 4-1 zu entnehmen ist, konnte der Verlauf bei kleineren Winkelgeschwindigkeiten und Schichtdicken gut beurteilt werden. Bei höheren Schichtdicken und Drehzahlen kam es bei den Versuchen zu Instabilitäten der Front und einem Schaumschlagen. Hierbei wird Luft unter die Flüssigkeit geschlagen. Dies führt zu einem Wandern der Vorderkante entgegen der Drehrichtung der Kokille (Winkel wird kleiner). In diesem Bereich ist eine Winkelbestimmung möglich, aber keine relevanten Ergebnisse sind daraus zu gewinnen. Abbildung 4-1 zeigt auch, dass der Keil bis zu einem bestimmten Punkt mitgenommen wird und sich danach schlagartig auflöst.

Da die Umfangsgeschwindigkeit der Kokille, die Rauheit der Kokille und der durchströmte Querschnitt in der Kokille bekannt ist, kann daraus die Reibung berechnet werden. Durch den Einfluss der Reynoldszahl sinkt mit steigender Reynoldszahl die errechnete Reibung ab. Diesen Effekt hat auch die ansteigende durchströmte Schicht. Um für alle durchgeführten Versuche vergleichbare Resultate zu erhalten, wurde ein Punkt 10° hinter der Vorderkante des Keils gewählt (Abbildung 3-19). Dieser Winkel wurde gewählt, da sich hier ein relativ ruhiger Bereich im Keil ausbildete. Dabei verändert sich mit steigender Umfangsgeschwindigkeit der durchströmte Querschnitt. Dies wurde in der Berechnung berücksichtigt. Zur Berechnung der Reynoldszahl wurde die Gleichung 2-14 und für die Reibzahl die Gleichung 2-23 verwendet. Die verwendete Gleichung nach Colebrook (2-23) deckt dabei den gesamten Bereich von laminar bis turbulent ab. Die errechneten Reibzahlen sind in Abbildung 4-2 ersichtlich. Der in dieser Abbildung angeführte Fehlerbalken stellt die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Standardabweichung dar.

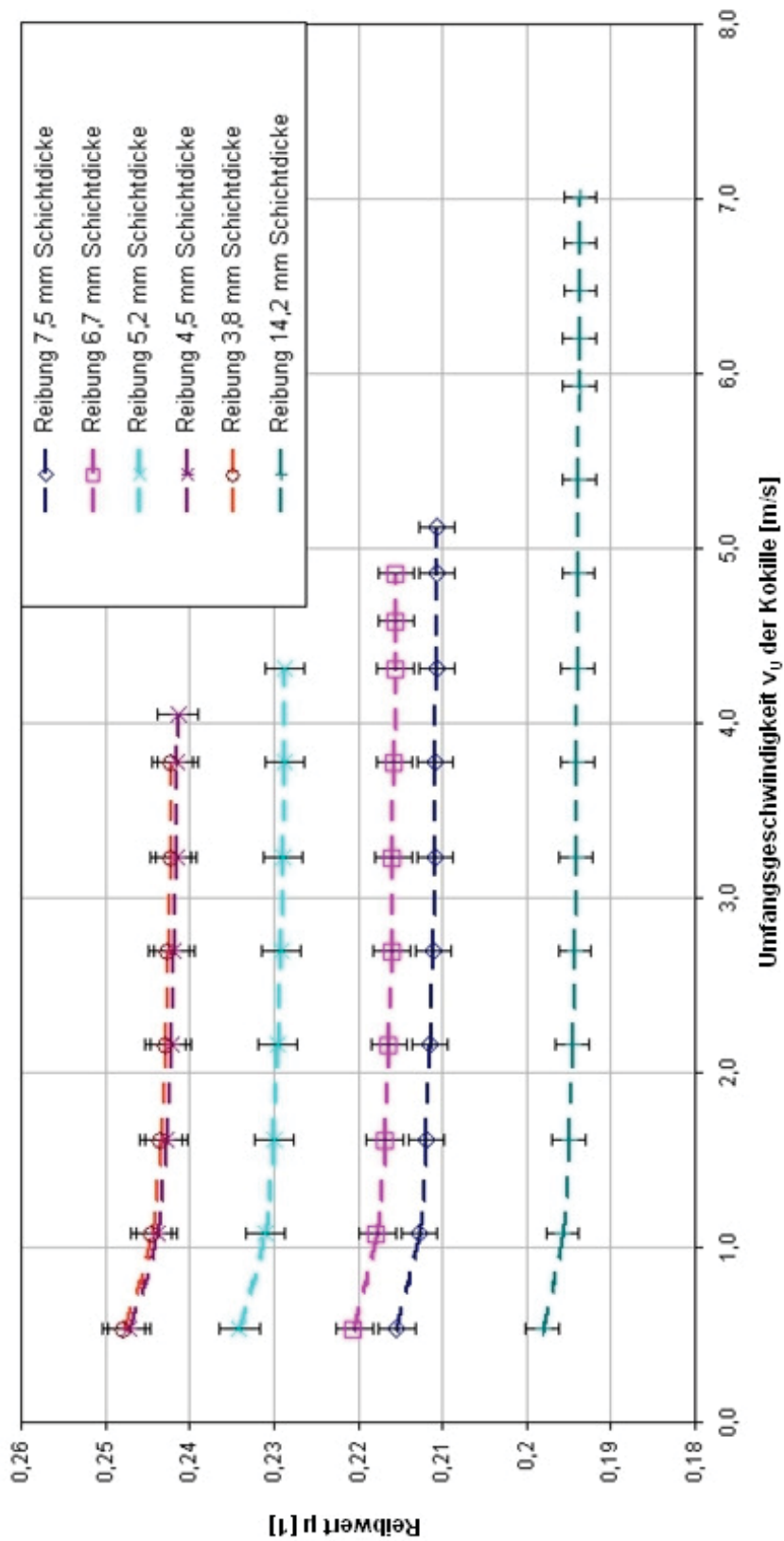


Abbildung 4-2: Reibwert in Abhängigkeit von Schichtdicke und Umfangsgeschwindigkeit.

4.1.2 Kritische Geschwindigkeit

Zur Bestimmung der kritischen Drehzahl (Versuche aus Kapitel 3.4.2.3) konnte das Auflösen des sich bildenden Fluidvorhanges verwendet werden. Dieser Vorhang bildete sich in der Mitte der Kokille. Nach dem Auflösen des Vorhanges wurde ein stabiler Flüssigkeitsring ausgebildet, weshalb dieses Phänomen als Referenz diente. In Abbildung 4-3 sind die Strömungsverhältnisse unterhalb der kritischen Drehzahl mit dem Vorhang zu sehen.

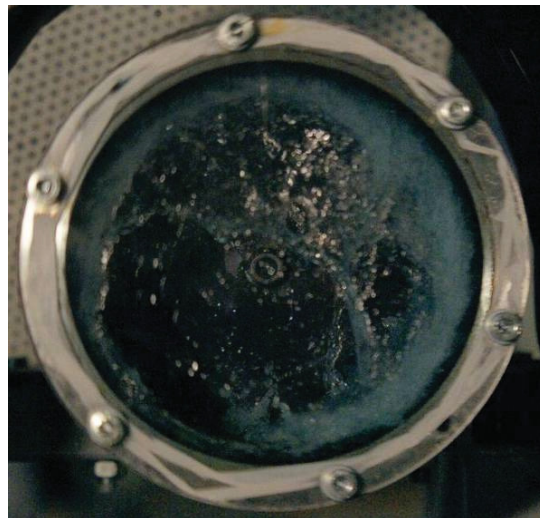


Abbildung 4-3: Vor Auflösen des Vorhanges.

Dieser Vorhang entstand bei ungefähr 80% der kritischen Umfangsgeschwindigkeit. Dies konnte sowohl bei Wasser als auch bei der verwendeten Metalllegierung beobachtet werden. Es war möglich diesen Vorhang über eine längere Zeit stabil zu halten. Beim Auflösen des Vorhanges konnte es zur Bedeckung des Schauglases kommen. Dies führte zu einer erschwerten Beobachtbarkeit der weiteren Versuche, da eine Ablösung des Films am Schauglas nicht stattfand. In Abbildung 4-4 ist der vollständig ausgebildete Fluidring (Wasser) ersichtlich.

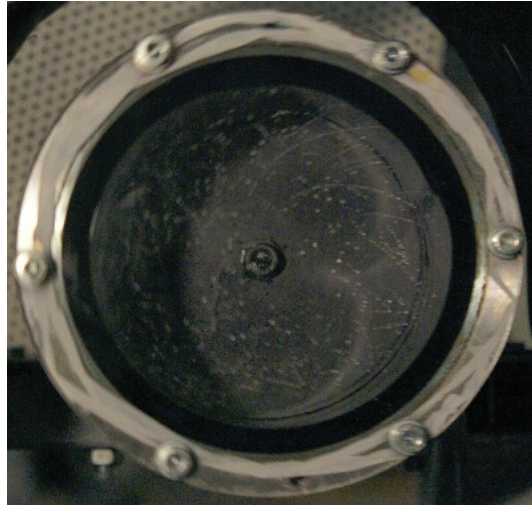


Abbildung 4-4: Nach Auflösen des Vorhanges.

In den dargestellten Tabellen 4-II und 4-III sind die Parameter zu den Versuchen ersichtlich.

Tabelle 4-II: Versuchsparameter Wasser

| <i>Einsatzmenge [ml]</i> | <i>Schichthöhe [mm]</i> |
|--------------------------|-------------------------|
| 200^{+5} | $3,1^{+0,1}$ |
| 250^{+5} | $3,8^{+0,1}$ |
| 300^{+5} | $4,5^{+0,1}$ |
| 350^{+5} | $5,2^{+0,1}$ |
| 400^{+5} | $6^{+0,1}$ |
| 450^{+5} | $6,7^{+0,1}$ |
| 500^{+5} | $7,5^{+0,1}$ |
| 550^{+5} | $8,3^{+0,1}$ |

Fortsetzung Tabelle 4-II

| Einsatzmenge [ml] | Schichthöhe [mm] |
|--------------------------|-------------------------|
| 600^{+5} | $9,2^{+0,1}$ |
| 650^{+5} | $10^{+0,1}$ |
| 700^{+5} | $10,7^{+0,1}$ |
| 750^{+5} | $11,5^{+0,1}$ |
| 800^{+5} | $12,4^{+0,1}$ |
| 850^{+5} | $13,3^{+0,12}$ |
| 900^{+5} | $14,2^{+0,1}$ |

Tabelle 4-III: Versuchsparameter Metalllegierung

| Einsatzmenge [g] | Schichthöhe [mm] |
|-------------------------|-------------------------|
| 200^{+2} | $3^{+0,1}$ |
| 250^{+2} | $3,9^{+0,1}$ |
| 350^{+2} | $5,6^{+0,1}$ |
| 450^{+2} | $7,2^{+0,1}$ |
| 550^{+2} | $8,9^{+0,1}$ |
| 650^{+2} | $10,7^{+0,1}$ |
| 750^{+2} | $12,9^{+0,1}$ |

Die Auswertung dieser Versuche zeigte eine Abhängigkeit der kritischen Geschwindigkeit von der vorhandenen Schichtdicke und vom verwendeten Medium. Diese Abhängigkeit lässt sich auf die auftretende Reibung (auf Grund der Wandrauigkeit und Reynoldszahl) und der

vorhandenen Viskosität erklären. Daraus resultiert ein Strömungsprofil im Fluid. Erst wenn die innerste Schicht die kritische Geschwindigkeit erreicht, überschreitet sie den obersten Totpunkt und ein stabiler Ring bildet sich aus. Diese Abhängigkeit von Schichtdicke und Medium ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Hierbei stellt der ersichtliche Fehlerbalken die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Standardabweichung dar.

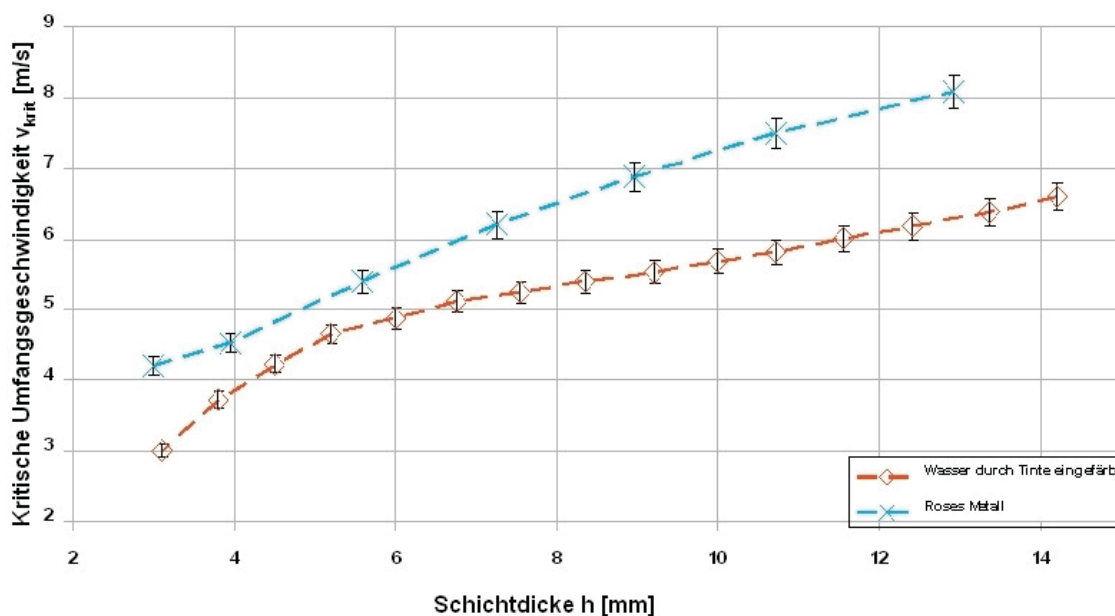


Abbildung 4-5: kritische Umfangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Schichtdicke

In Abbildung 4-5 ist neben den ermittelten kritischen Drehzahlen auch die theoretische Grenze über das Gleichgewicht der Kräfte eingetragen. Es ist die Ausbildung eines annähernd linearen Bereichs sowohl bei Wasser, wie auch bei der Metalllegierung ersichtlich. Dieser Bereich liegt bei der Metalllegierung zwischen 4 mm und 12 mm. Bei Wasser tritt dieser Bereich erst später auf (zwischen 6mm und 13 mm). Eine Aussage unterhalb von 4mm ist nicht sinnvoll, da die Hämmerung eine Tiefe von 0,3 – 0,5 mm aufweist. Dadurch hat die Hämmerung einen großen Einfluss auf die vorherrschenden Bedingungen in der Kokille. Die dabei entscheidenden Effekte wurden nicht untersucht. Des Weiteren streuen, wie in Abbildung 4-5 ersichtlich, die Messwerte nur geringfügig (die durchschnittliche Standardabweichung liegt bei 2,5 Umdrehungen). Dies lässt auf eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche schließen. Wie bereits in Kapitel 3.4.2.3 beschrieben kam

es zur Ausbildung eines Flüssigkeitsvorhanges kurz vor Erreichen der kritischen Drehzahl. Dieser Vorhang war auch bei der verwendeten Metallegierung zu beobachten (Abbildung 4-6).



Abbildung 4-6: Flüssigkeitsvorhang bei der Metallegierung.

Die auftretende Reibung zwischen Kokille und Fluid wurde wie in Kapitel 4.1.1 berechnet. Dabei tritt jedoch der Unterschied auf, dass hier die durchflossene Schicht einen konstanten Wert annimmt. Die Abhängigkeit der Reibung von der Umfangsgeschwindigkeit und Schichtdicke für Wasser und die verwendete Metallegierung ist in Abbildung 4-7 ersichtlich.

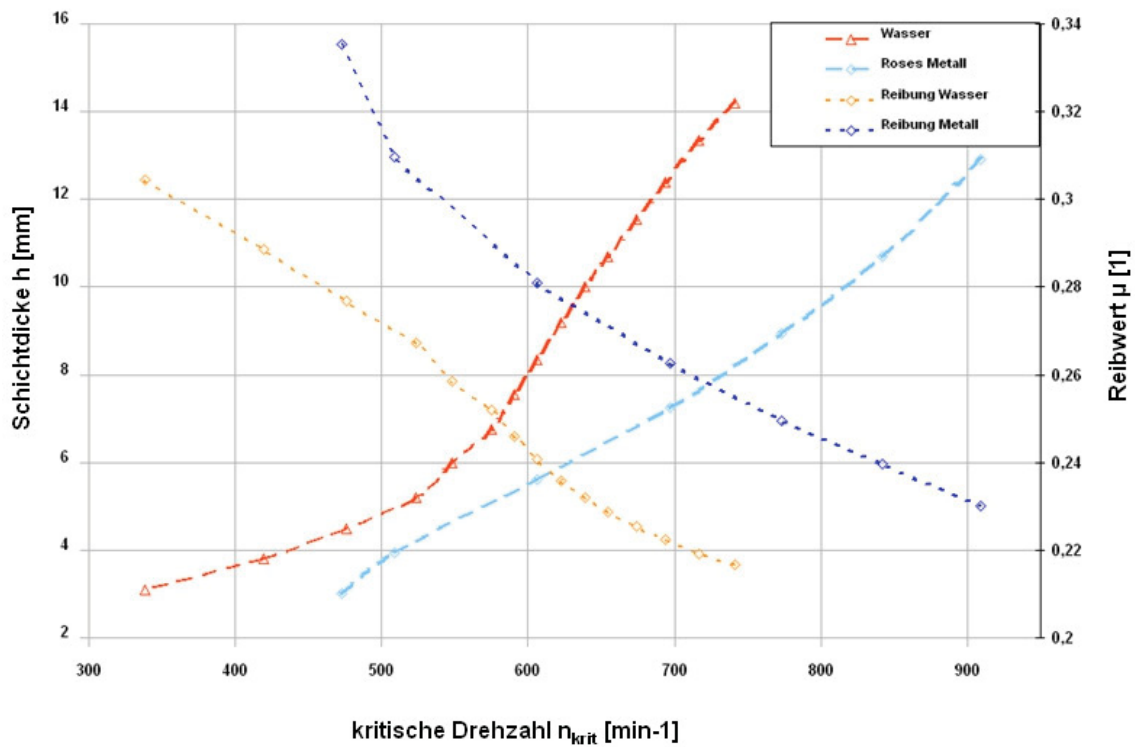


Abbildung 4-7: Reibwert und Schichtdicke über kritischer Drehzahl.

In Abbildung 4-7 zeigt sich, dass die Metalllegierung höhere Reibwerte als Wasser aufweist. Dies ist eine Folge der höheren Viskosität und dadurch niedrigeren Reynoldszahl. Daher liegt in einem weiteren Bereich eine laminare Strömung mit erhöhter Reibung vor. Da bei Wasser eine annähernd lineare Abnahme der Reibung vorliegt, ist man hier bereits im Bereich von einer turbulenten Strömung. Bei der Metalllegierung liegt dieser lineare Bereich noch nicht vor, da hier der Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung vorliegt.

4.2 Offene Kokille

Tabelle 4-IV gibt die Versuchsparameter für die Versuche zum Aufgießen der Metallschmelze wieder.

Tabelle 4- IV: Versuchsparameter

| <i>Eingussmenge [g]</i> | <i>Temperatur der Kokille [°C]</i> | <i>Temperatur der Schmelze [°C]</i> |
|-----------------------------|--|---|
| 450^{+5} | 20^{+1} | 112^{+1} |
| 1450^{+5} | 20^{+1} | 118^{+1} |
| 2500^{+5} | 80^{+1} | 116v |

Da es sich hierbei um die ersten durchgeführten Versuche handelte, war die Aufzeichnung der Versuche noch mit Problemen behaftet und dienten in erster Linie zum Verständnis des gesamten Ablaufs. Diese Probleme lagen in einer schlechten Ausleuchtung der Kokille und in einer schlechten Positionierung der Kamera.

Bei der auftretenden Strömung handelt es sich hierbei um eine Überlagerung einer Staupunktströmung (Kapitel 2.2.1) und einer laminaren Strömung. Der Abstand a ist jener Abstand, bei dem ein Gleichgewicht zwischen den beiden überlagerten Strömungen vorherrscht. Das Schema dieser Überlagerung ist in Abbildung 4-8 ersichtlich.

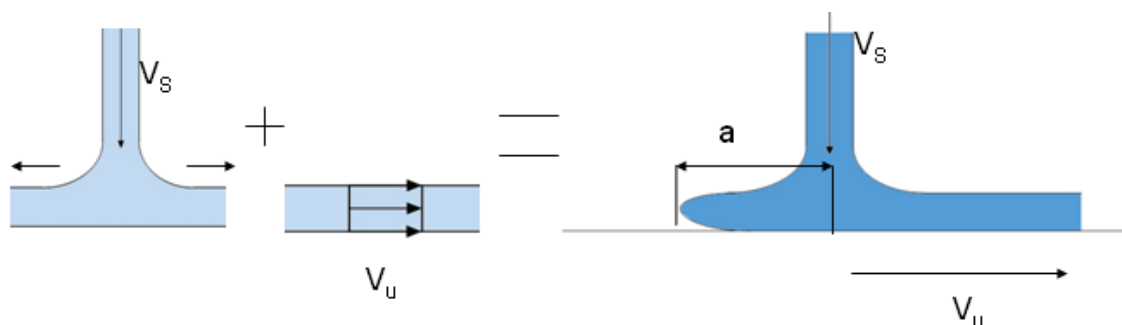


Abbildung 4-8: Überlagerung der Staupunktströmung und der laminaren Strömung.

In dieser Abbildung entspricht der Abstand a dem in Abbildung 4-8 enthaltenen Abstand a . Weiters sind in dieser Abbildung die Geschwindigkeit v_u und v_s eingetragen. Hierbei entspricht v_u der Umfangsgeschwindigkeit der Kokille und v_s der Einströmgeschwindigkeit.

Die Auswertung zeigt hier ebenfalls eine Abhängigkeit der Position der Vorderkante der Schmelze von der Umfangsgeschwindigkeit der Kokille. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 4-9 ersichtlich. Der in dieser Abbildung ersichtliche Fehlerbalken stellt die in Kapitel 3.4.2 beschriebene Standardabweichung dar.

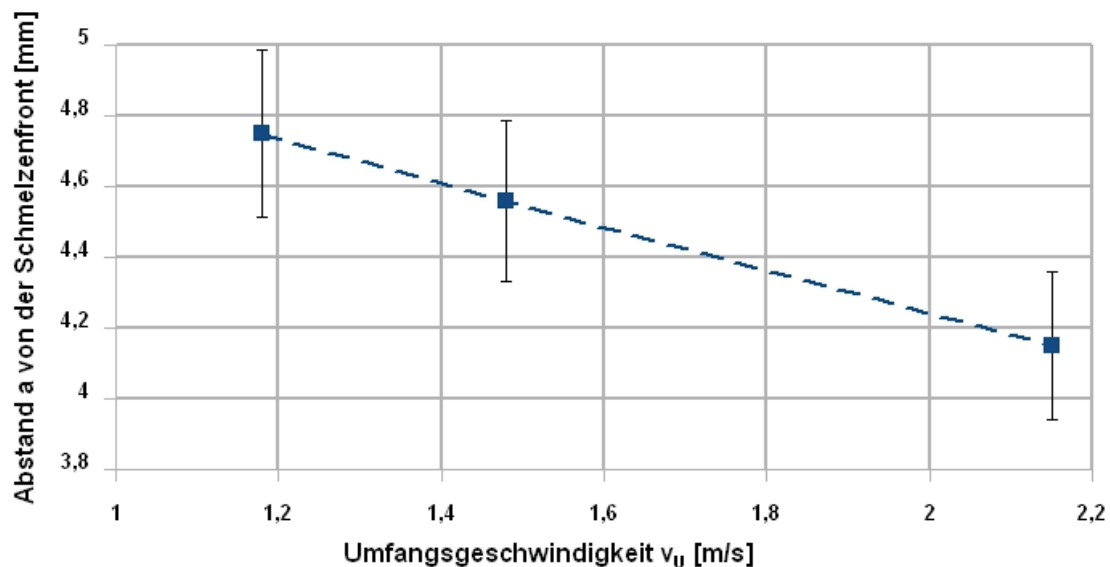


Abbildung 4-9 Abhängigkeit der Vorderkante der Strömung von der Umfangsgeschwindigkeit der Kokille.

Wie in Abbildung 4-9 ersichtlich ist, lag hier eine hohe Standardabweichung vor. Dies war auf eine variierende Gießgeschwindigkeit zurückzuführen. Auf Grund der geringen Schichtdicke lag hier eine hohe Reibung vor. Zur Auswertung wurde wieder die Gleichung 2-23 verwendet. Auf Grund des geringen Einflusses der Reynolds'schen Zahl auf den Reibwert (Verhältnis von Schichtdicke zu Rauigkeit), ergibt sich ein Reibwert von 0,4 beim Aufgießen auf die Kokille.

4.3 Versuche mit dem Teller

Bei diesen Versuchen wurde der Abstand der Vorderkante der Schmelze vom Auftreffpunkt auf den Teller und die Breitung der Schmelze bestimmt. Eine Analyse des GJS nach dem Aufschmelzen ist in Tabelle 4-V ersichtlich.

Tabelle 4-V: Analyse GJS

| <i>Legierungselement</i> | <i>Gehalt [%]</i> |
|--------------------------|-------------------|
| <i>C</i> | <i>3,650</i> |
| <i>Si</i> | <i>2,260</i> |
| <i>Mn</i> | <i>0,330</i> |
| <i>P</i> | <i>0,042</i> |
| <i>S</i> | <i><0,003</i> |
| <i>Cu</i> | <i>0,210</i> |
| <i>Cr</i> | <i>0,100</i> |
| <i>Mg</i> | <i>0,015</i> |

Diese Versuche wurden bei unterschiedlichen Drehzahlen des Tellers durchgeführt. Eine Vorwärmung des Tellers fand nicht statt. Bei den letzten Versuchen wurde eine Bornitrid Schichte aufgetragen, was zu einer Veränderung der Oberfläche führte. In Tabelle 4-VI sind die Versuchsparameter zu den Versuchen im vertikalen Schleuderguss ersichtlich.

Tabelle 4-VI: Versuchsparameter vertikaler Schleuderguss

| Versuch | Gießzeit [s] | Gießtemp. [°C] | Aufgabe - Gewicht [g] | Oberfl. Temp. vor Aufgabe [°C] | Oberfl. Temp. nach Aufgabe [°C] | Aufgabepunkt |
|----------------|-------------------------|---------------------------|----------------------------------|---|--|---------------------|
| 1 | $6,3^{+0,1}$ | 1448^{+1} | 2503^{+1} | 90 | 174 | halber Radius |
| 2 | $7,3^{+0,1}$ | 1440^{+1} | 2505^{+1} | 21 | 105 | halber Radius |
| 3 | $6,1^{+0,1}$ | 1438^{+1} | 2506^{+1} | 89 | 200 | halber Radius |
| 4 | $6,4^{+0,1}$ | 1437^{+1} | 2504^{+1} | 100 | 180 | halber Radius |
| 5 | $6^{+0,1}$ | 1446^{+1} | 2504^{+1} | 43 | 164 | halber Radius |
| 7 | $7,6^{+0,1}$ | 1450^{+1} | 2501^{+1} | 21 | 107 | Mitte |
| 8 | $6,4^{+0,1}$ | 1448^{+1} | 2504^{+1} | 77 | 62 | Mitte |

Bei der Position der Vorderkante zeigte wie in Kapitel 4.1.1 und 4.2 eine Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit. Eine genaue Beurteilung der Vorderkante der Strömung war nicht möglich. Dies liegt daran, dass die Schmelzenfront zu Instabilitäten neigt. Dabei kommt es im Bereich der Front zu Ablösungen von einzelnen Tropfen (Zerfließen der Schmelze auf Grund der Oberflächenspannung). In Abbildung 4-10 ist die Abhängigkeit des Abstandes der Vorderkante der Schmelze und der Breite von der Umfangsgeschwindigkeit und der Verwendung einer Schlichte ersichtlich. Hierbei stellt der ersichtliche Fehlerbalken die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Standardabweichung dar.

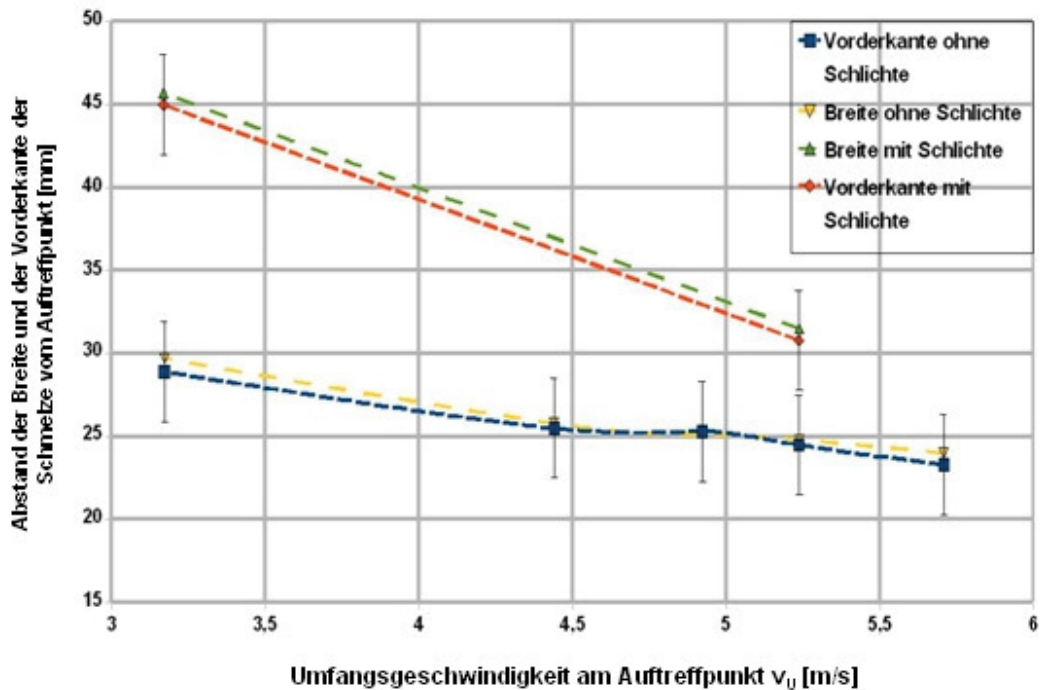


Abbildung 4-10: Abhängigkeit der Vorderkante und der Breite der Schmelze in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit und der Verwendung einer Schlichte.

Hier variiert wie in Tabelle 4-VI ersichtlich, die Gießzeit von 6-7,5 s. Die Bestimmung der Reibung erfolgte wie in Kapitel 4.1.1 bis 4.2 nach Colebrook (Gleichung 2-23) Daraus ergab sich eine Reibung von 0,43 für den Teller ohne Schlichte und von 0,32 für den Teller mit Schlichte. Da in diesen Fällen eine geringe Schichtdicke vorlag, ist der Einfluss der Reynolds'schen Zahl auf das berechnete Ergebnis gering. In diesem Fall bestimmte nur das Verhältnis von Schichtdicke zur Rauigkeit den berechneten Reibwert. Der errechnete Reibwert in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit ist in Abbildung 4-12 dargestellt mit der Standardabweichung (Kapitel 3.4.1) als Fehlerbalken.

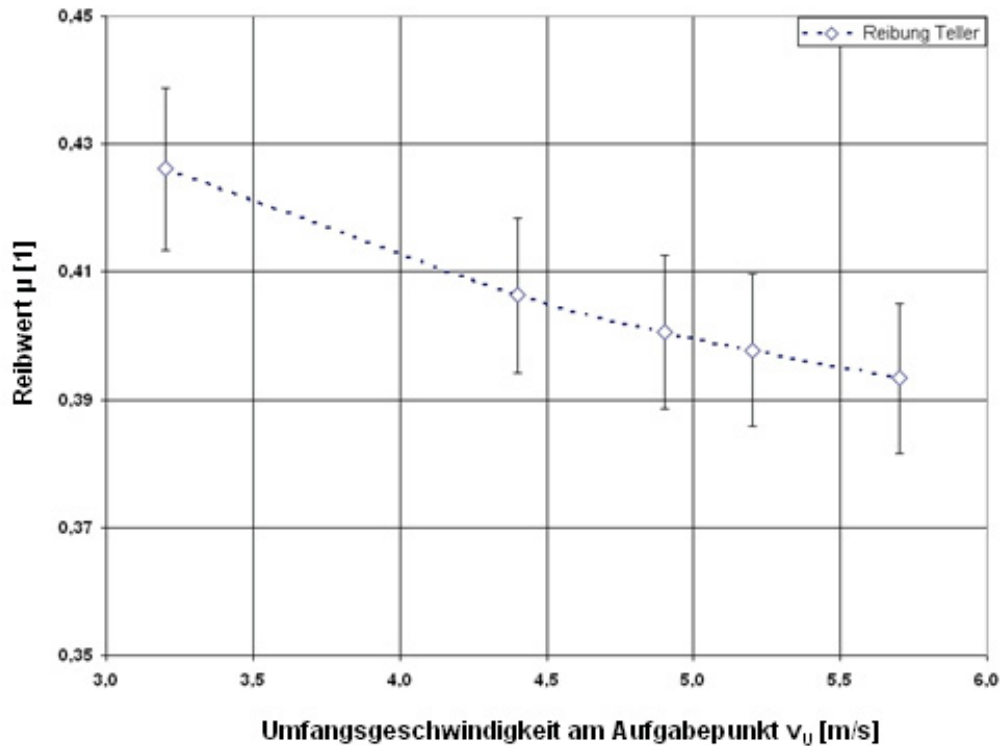


Abbildung 4-11: Reibung beim Teller in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit beim Aufgabepunkt.

Wie aus Abbildung 4-12 zu entnehmen ist, sinkt der Reibwert mit steigender Geschwindigkeit. Bei diesen Versuchen kam es zur Bildung eines erstarrten Ringes im Auffangbereich des Tellers. Bei diesem Ring kam es zu einer unterschiedlichen Ausbildung der Oberfläche. Bei Verwendung einer Schlichte bildete sich ein dichter Ring mit einer relativ glatten Oberfläche (Abbildung 4-12).



Abbildung 4-12: Teil eines Ringes, mit Schlichte gegossen.

Wurde keine Schlichte verwendet kam es zur Bildung eines ausgefranstes Ringes. Dieser Ring entstand aus Schichten, welche einen spröden Verbund bildeten (Abbildung 4-13).



Abbildung 4-13: Teil eines Ringes, ohne Schlichte gegossen.

Diese Teilfragmente zeigten den starken Einfluss der Schlichte auf die Benetzbarkeit der Oberfläche des Tellers.

5 Vergleich Versuchsergebnisse und erste Simulationen

5.1 Allgemein

Bei den Versuchen wurde ein in der Software enthaltener Reibparameter, welcher physikalisch nicht mit dem berechneten Reibwert übereinstimmt, so variiert, dass eine Abbildung der Versuche mittels Simulation möglich war. Die Simulation wurde von Hr. Dr. Kaschnitz am ÖGI durchgeführt. Bei dem dafür eingesetzten Simulationsprogramm handelte sich um Flow 3D®.

5.2 Geschlossene Kokille

Die Auswertung der ersten Simulationen stimmte mit den Versuchsergebnissen in weiten Bereichen überein. Es wurde bei den Simulationen die gleiche Hochfahrkurve wie bei den Versuchen verwendet (Abbildung 3-21). Die größte Unsicherheit bei den Simulationen stellte der im Simulationsprogramm einstellbare Reibparameter (Reibparameter Simulation) dar. Dieser Reibparameter hat die Einheit mm und stellt jenen Bereich dar, in welchen Schubspannungen innerhalb einer Zelle von der Wand auf das Fluid übertragen werden können. So zeigten die Simulationen eine starke Abhängigkeit von der eingestellten Wandrauhigkeit. Dies zeigt sich in Abbildung 5-1, wo eine Rauigkeit von 0 mm eingestellt wurde. Bei dieser Simulation wurde die Loopingbedingung zu Simulationsende (nach 30 s) nicht erfüllt.

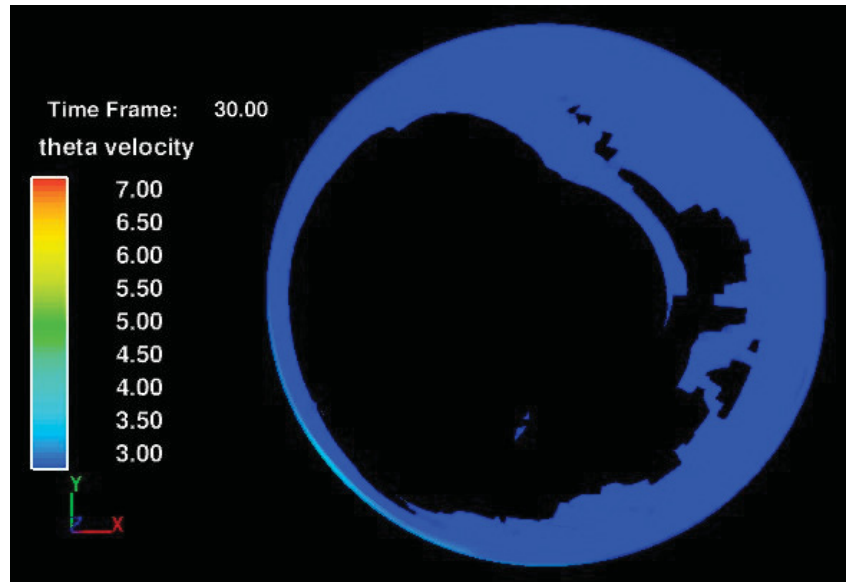


Abbildung 5-1: Simulation mit einer eingestellten Reibparameter von 0 mm [49].

Bei einer Erhöhung des Reibparameters auf einen Wert von 0,5 mm wird mit der Simulation eine Annäherung an die Versuchsergebnisse erreicht. Dabei kommt es zu Simulationseende zu einer vollständigen Ausbildung des Fluidrings (Abbildung 5-2).

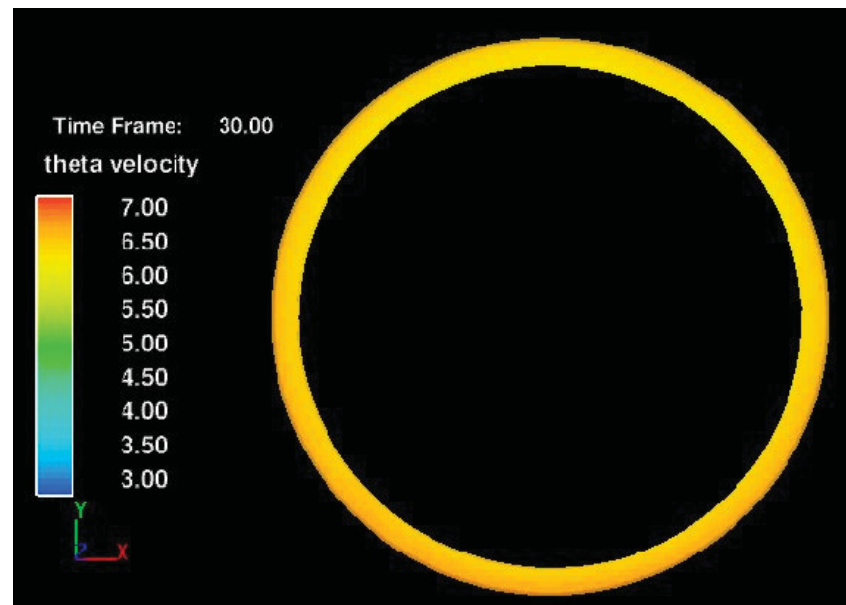


Abbildung 5-2: Simulation mit einer eingestellten Reibparameter von 0,5 mm [49].

Im Gegensatz zur starken Abhängigkeit von der Wandrauigkeit zeigte die Simulation bei einer Änderung der Viskosität (Umstellung zwischen Wasser und Metalllegierung) keine große Veränderung. Es kam lediglich zu einer Erhöhung der kritischen Drehzahl in Abhängigkeit der Schichtdicke. Dies war auch in den Versuchen zu beobachten gewesen (Abbildung 5-3).

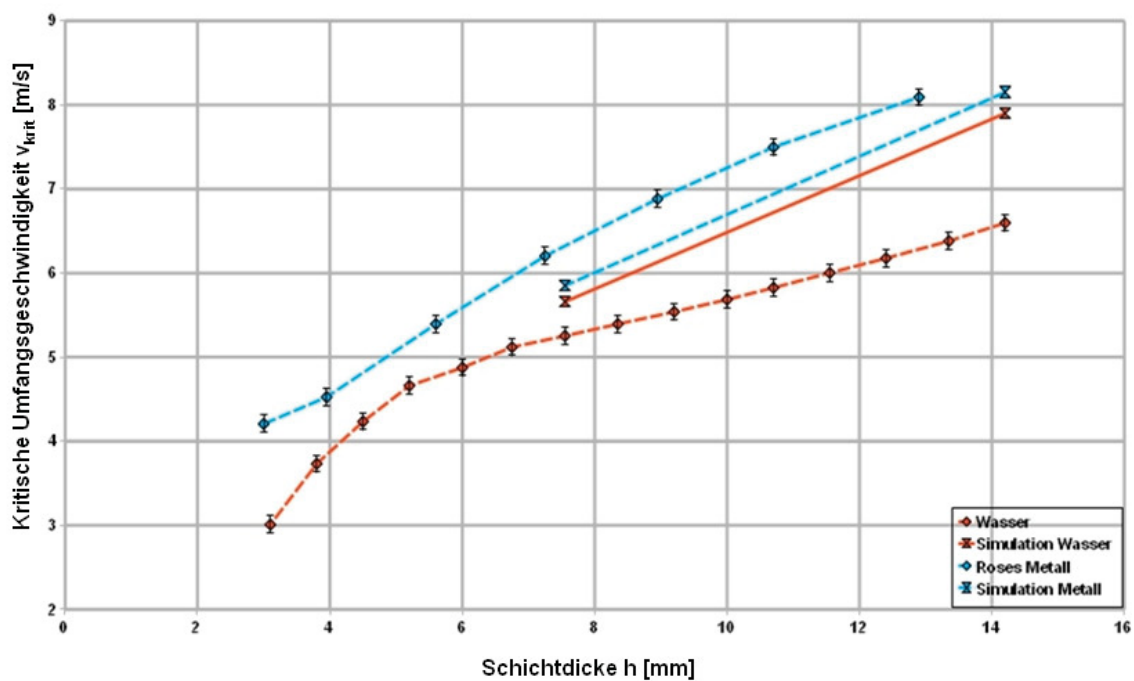


Abbildung 5-3: Abhängigkeit der kritischen Geschwindigkeit von der Schichtdicke mit Auswertung der Simulationsergebnisse für einen Reibparameter von 0,5 mm.

Die Auswertung der Simulationen zur Mitnahme im laminaren Bereich zeigte, dass die Simulationen hier sehr gut mit den Versuchsergebnissen übereinstimmten. Erst beim Übergang in eine komplett turbulente Strömung weichen die Ergebnisse stark ab (Abbildung 5-4).

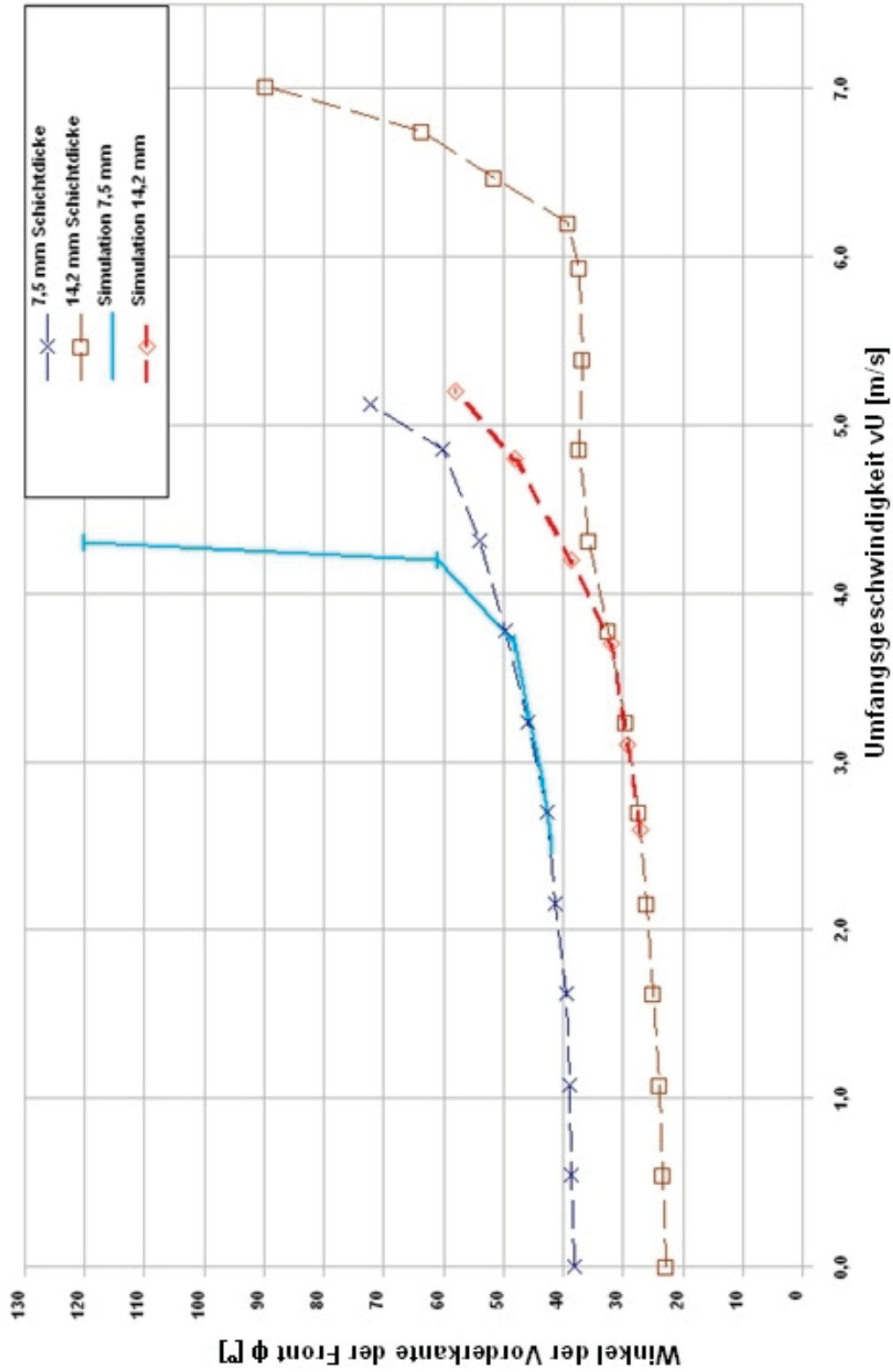


Abbildung 5-4: experimenteller Winkel der Schmelzenfront in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit im Vergleich zur Auswertung der Simulation für einen Reibparameter von 0,5mm.

Das in den Versuchen beobachtete schlagartige Auflösen des sich bildenden Keils zeigten die Simulationen ebenfalls. In Abbildung 5-5 ist der Keil nach 20,5 s Simulationsdauer noch vorhanden. Bei dieser Simulation wurde ein Reibparameter von 0,5 mm verwendet.

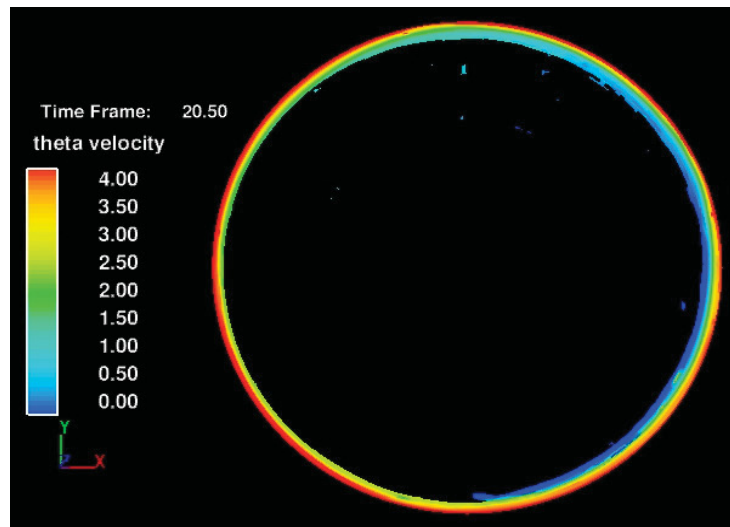


Abbildung 5-5: Simulation nach 20,5 s mit einem Rauigkeitswert von 0,5 mm [49].

Bei fortschreitender Simulationsdauer kam es zu einem schlagartigen Auflösen des Keils. Dieses Verhalten ist in Abbildung 5-6 ersichtlich.

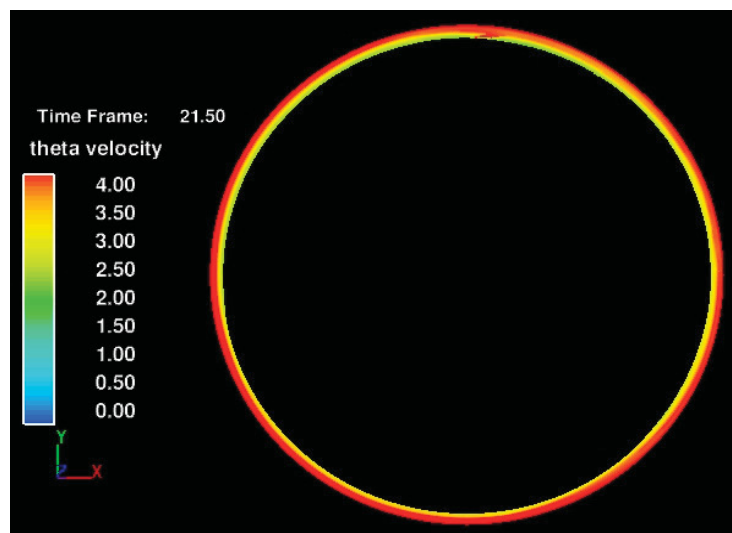


Abbildung 5-6: Simulation nach 21,5 s Rauigkeitswert von 0,5 mm und aufgelösten Keil [49].

5.3 Rotierender Teller

Die ersten Simulationen des rotierenden Tellers zeigten ein ähnliches Verhalten wie die Versuche. Die Simulation zeigte ebenfalls das Auftreten der Instabilitäten an der Front und das Ablösen von einzelnen Tropfen der Schmelze. Dies ist in Abbildung 5-7 ersichtlich.

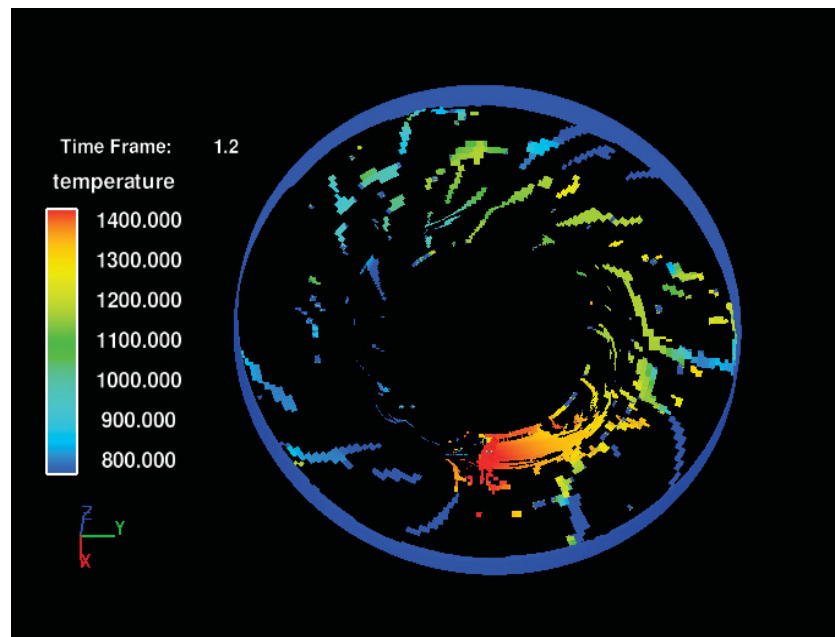


Abbildung 5-7: Simulation des Tellers mit einem Reibparameter von 0,5 mm[49].

Die freien Bereiche in der Simulation bedeuten jedoch nicht, dass in diesem Bereich kein Fluid vorhanden ist, sondern lediglich, dass die Schichtdicke unter der halben Zellengröße liegt. Zum Vergleich ist in Abbildung 3-24 das Aufgießen auf den rotierenden Teller zu sehen. Aus den Abbildungen 5-7 und 3-24 lässt sich erkennen, dass das prinzipielle Verhalten der Simulation den Versuchen entspricht. Die Simulation zeigte jedoch nicht, den sich in den Versuchen bildenden erstarrten Ring im Aufgabebereich. Weiters wurde das „Wegspritzen“ von einzelnen Tropfen, wie in Abbildung 3-24 ersichtlich, dargestellt.

6 Zusammenfassung

Es muss eine Unterscheidung der einzelnen Parameter für die Reibung getroffen werden da insgesamt drei Parameter für die Reibung verwendet werden. Diese Parameter sind die Rauigkeit der Kokille k (Kapitel 3.3.1), der Reibparameter in den Simulationen (RPS, Kapitel 5) und der mittels der Gleichung nach Colebrook (Gleichung 2-23) errechnete Reibwert. Die Versuche lieferten die Grundlagen zur Bestimmung der Strömungsverhältnisse in der Kokille. Auf Grund dieser Ergebnisse war eine Verwendung der Formel nach Colebrook erst möglich. Dies beruht darauf, dass die in der Formel enthaltene durchflossene Höhe nicht bekannt war und erst bestimmt werden musste. Diese Höhe spielt sowohl für die berechnete Reynoldszahl, als auch für den Reibwert eine Rolle. Beim Reibwert verändert sich das Verhältnis von Rauigkeit zu durchflossener Höhe. In die Reynoldszahl geht sie als Zähler ein. Dadurch bewirkt eine Zunahme der Höhe eine Erhöhung der Reynoldszahl, was den Übergang zu einer turbulenten Strömung fördert. Weiters führt die erhöhte Reynoldszahl zu einer Absenkung des Reibwertes. Dem entgegen bewirkt eine Veränderung der Wandrauigkeit zu höheren Werten eine Erhöhung des Reibwertes. Dies ist in Abbildung 6-1 für eine Schichtdicke von 7,5 mm (bei Ausbildung des Fluidrings) ersichtlich. Als Grundlage zur Berechnung dienten die in Kapitel 3.4.2.3 beschriebenen Versuche.

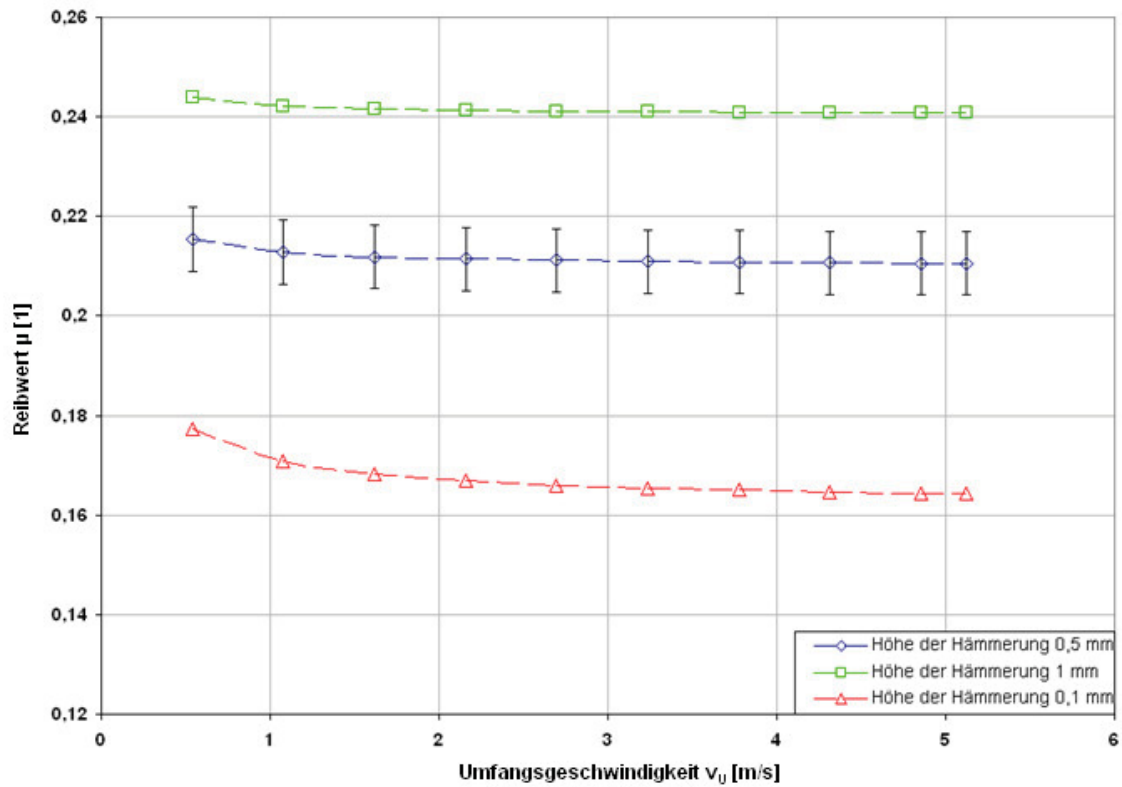


Abbildung 6-1: Einfluss der Höhe der Hämmerung auf den Reibwert bei Schichtdicke von 7,5mm.

Aus diesem Diagramm ist ersichtlich, dass die Wandrauigkeit einen starken Einfluss auf den ermittelten Reibwert hat. Einen weiteren Einfluss auf die ermittelte Rauigkeit hat die Veränderung der Schichtdicke mit sich verändernden Abstand von der Vorderkante des Keils. In Abbildung 6-2 ist das Schema der Veränderung des Winkels zu sehen.

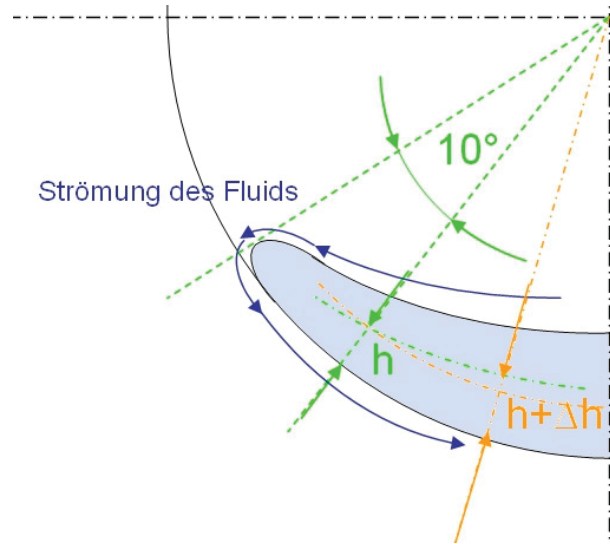


Abbildung 6-2: Veränderung der Höhe h um den Faktor Δh bei Veränderung des Winkels.

In dieser Abbildung (6-2) ist ersichtlich, dass sich die Höhe bei einer Winkeländerung um den Faktor Δh verändert. Der Einfluss des Winkels auf den berechneten Reibwert ist in Abbildung 6-3 für eine Schichtdicke von 7,5 mm zu sehen.

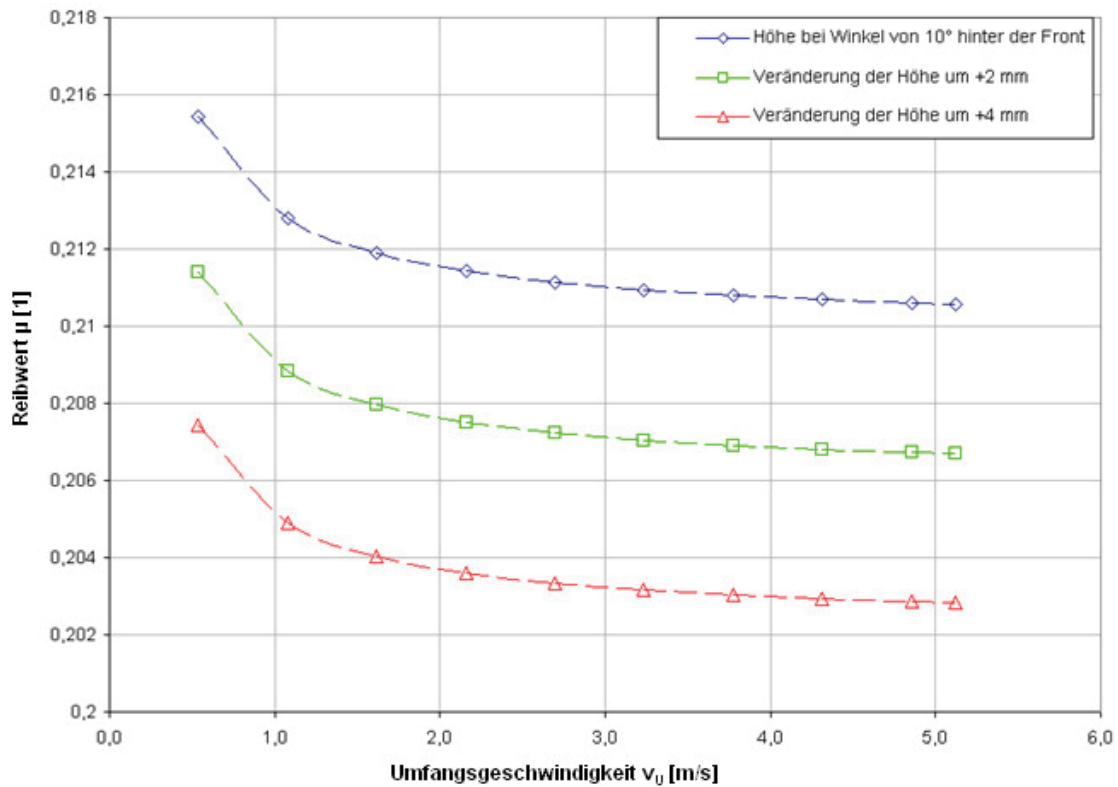


Abbildung 6-2: Einfluss der Höhe der auf den Reibwert ausgehende von einer experimentellen Schichtdicke von 7,5mm.

Wie Abbildung 6-3 zeigt, ist der Einfluss des Faktors Δh auf den errechneten Reibwert gering. Der Einfluss der Viskosität ist in Abbildung 6-4 ersichtlich. Dabei wird deutlich, dass die errechneten Werte stärker auf eine Veränderung der Viskosität reagieren, als die Simulationen. Dies zeigt sich vor allem dadurch, dass die kritischen Umfangsgeschwindigkeiten von Wasser und der Metalllegierung in der Simulation näher beisammen liegen, als die über die Versuche ermittelten Werte (Abbildung 6-4).

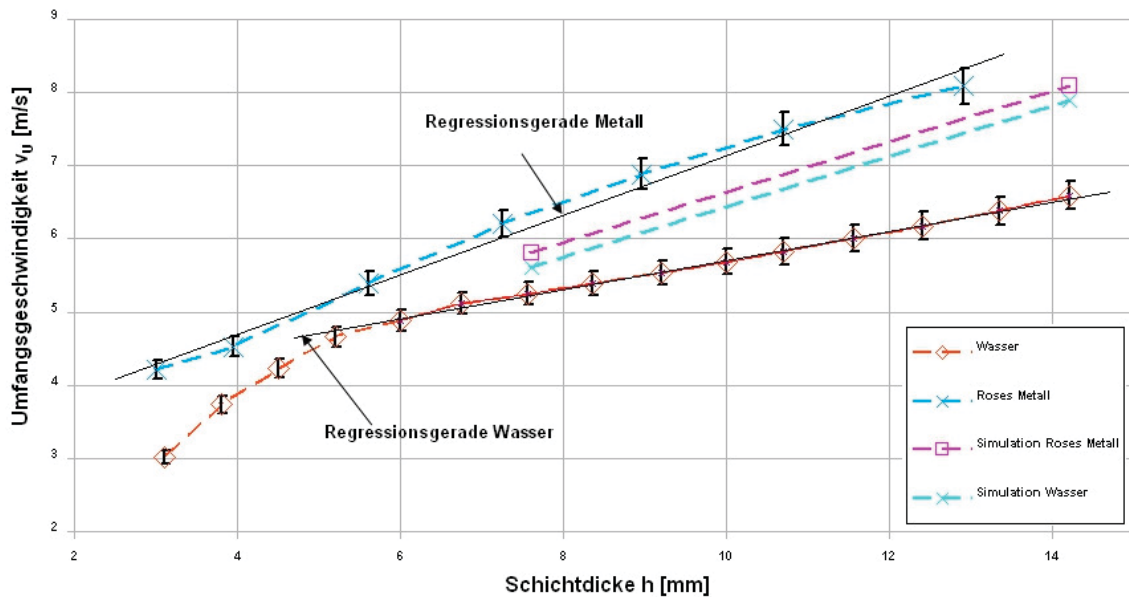


Abbildung 6-4: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen und Regressionsgeraden bei der kritischen Umfangsgeschwindigkeit.

Wie aus Abbildung 6-4 ersichtlich, weist die lineare Regressionsgerade für die Metalllegierung eine nahezu gleiche Steigung wie die Regressionsgerade für die Simulationsergebnisse der Metalllegierung auf. Es liegt jedoch eine Verschiebung zu höheren Werten bezüglich der kritischen Umfangsgeschwindigkeit vor. Für Wasser gibt es bei einer Betrachtung ab einer Schichtdicke von 5 mm eine Abweichung in der Steigung der Regressionsgeraden gegenüber den Simulationsergebnissen.

Bei den Versuchen aus Kapitel 3.4.2.3 wurde der in Abbildung 4-3 gezeigte Fluidvorhang beobachtet. Inwieweit dieses Phänomen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hatte, wurde nicht abgeklärt. Das Auftreten des Vorhanges hatte jedoch den Vorteil, dass dadurch eine eindeutige Bestimmung der kritischen Umfangsgeschwindigkeit möglich wurde (Auflösen des Vorhanges). In Abbildung 6-5 ist das Schema der Strömungen, welche zur Entstehung des Vorhanges führen dargestellt.

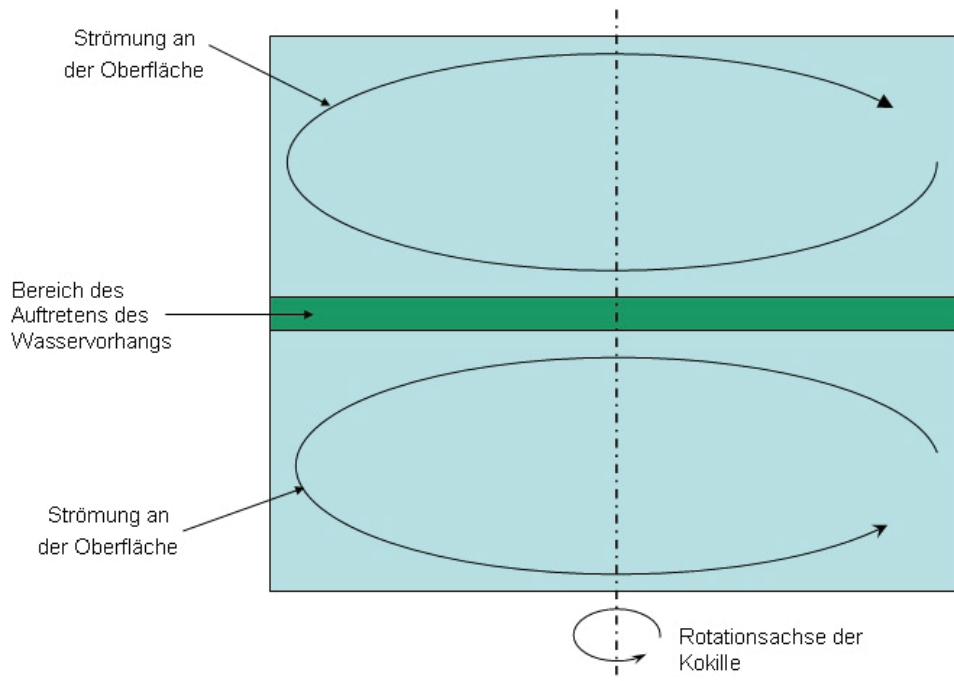


Abbildung 6-5: Schema zur Entstehung des Fluidsvorhangs auf Grund der Oberflächenströmung in der Kokille .

Durch die Mitnahme des Fluids an der Oberfläche der Kokille kommt es zur Ausbildung von zwei rotierenden Strömungen. Im Bereich, wo die Strömung entgegen der Rotationsrichtung strömt, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit ab. In diesem Bereich entsteht der Fluidvorhang. Durch die geringe Standardabweichung kann auf eine gute Reproduzierbarkeit geschlossen werden. Dies lässt auch auf geringe zufällige Fehler während des Messvorganges schließen. Ein Vergleich zwischen dem Colebrooke-Diagramm (Abbildung 2-10) und einer Darstellung des Reibwertes über der Reynoldszahl (logarithmische Darstellung, Abbildung 6-6) zeigt, dass die ermittelten Reibwerte im Übergangsbereich von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung liegt.

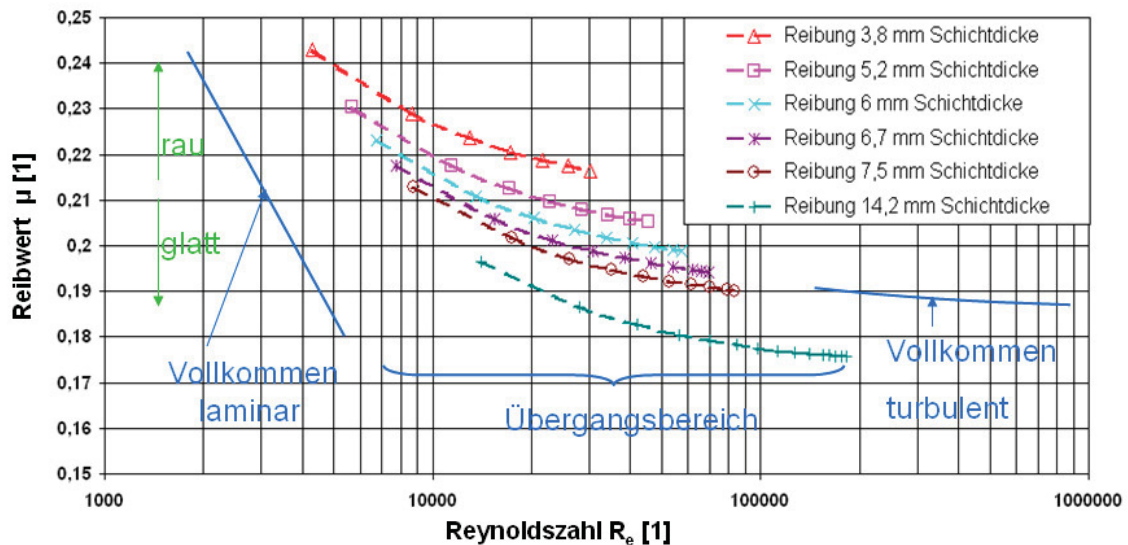


Abbildung 6-4: Reibwert über log. Reynoldszahl.

Aus diesem Diagramm (Abbildung 6-6) lässt sich erkennen, dass bei steigender Umfangsgeschwindigkeit keine große Änderung der auftretenden Reibung stattfindet. Da die auftretende Reibung (Reibwert) ein hydrodynamisches Verhalten aufweist, ist eine Bestimmung auf einen exakten, eindeutigen Wert über einen weiten Bereich nicht möglich. Die Reibung variiert je nach Schichtdicke und auftretender Umfangsgeschwindigkeit zwischen 0,16 bis 0,5. Dabei muss unterschieden werden zwischen der auftretenden Reibung beim Beschleunigen der Kokille (instationär) und im stationären Bereich (Loopingbedingung erfüllt). Der in den Simulationen verwendete Reibparameter wurde an die Versuchsergebnisse angepasst um eine Abbildung der Versuche mittels Simulation zu erreichen. Dabei zeigte sich, dass die Simulation auf Änderungen der Viskosität nicht so stark reagierte wie auf Änderungen der Reibung (Abbildung 5-1, 5-2 und 5-3). Der Reibparameter der Simulation beschreibt die Übertragung von Scherspannungen von der Kokillenwand auf das Fluid. Bei einem RPS von 0,5 mm und einer Zellengröße von 1 mm bedeutet das, dass bis zur Hälfte der äußersten Zelle die maximal mögliche Scherspannung übertragen wird. Nach ca. 3 Zellen hat dieser Parameter keinen Einfluss mehr. Auf Grund der Simulationsergebnisse zeigte sich, dass die Verwendung eines Simulationsreibparameters von 0,5 mm gute und mit den Versuchen vergleichbare Ergebnisse lieferte.

Literaturverzeichnis

- [1] D. de Lavaud; Rotary Casting; US. Pat. No. 1,377,406; 1921.
- [2] S. Haase; Giessereilexikon; Schiele und Schön; (1993); 1040-1045.
- [3] N. Janco; Centrifugal Casting; American Foundrymen's Society; Des Plains ;(1998); 15-35.
- [4] J. Campbell; Castings Second Edition; Butterworth-Heinemann; (2003); 70-98.
- [5] P. Nixon; Advantages of castings produced by the centrispinning process; Foundry Trade Journal; Vol. 161; (1987); 557-559.
- [6] A. Halvae, Talebi A.; Effect of process variables on microstructure and segregation in centrifugal casting of C92200 alloy; Journal of Materials Technology; Vol. 118; (2001); 123-127.
- [7] K. Watanabe, Miyakawa O., Takada Y., Okuno O.; Okabe T.; Casting behaviour of titanium alloys in a centrifugal casting machine; Biomaterials; Vol. 24; (2003);1734-1743.
- [8] H. G. Halt; Das Leichtmetallschleudergiessverfahren; VEB Verlag Technik Berlin; (1953); 5-18.
- [9] H. Dettela, Preisendanz H.; Über das Schleudergiessen von Stahl; VDG-Fachbericht; (1977); 7-21.

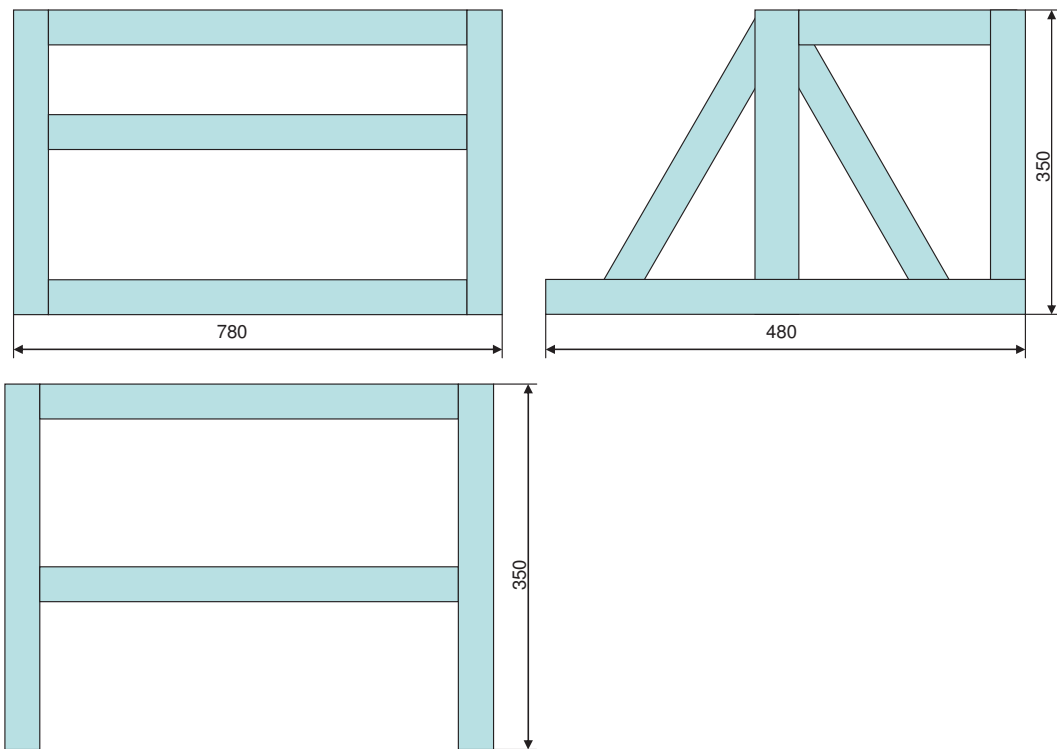
- [10] Z. Gorny; Grundlagen und Technologie der Schleudergießverfahren; Düsseldorf; (1977); 8-25.
- [11] E. Panda, Mazumdar D., Meherota S. P.; Mathematical Modelling of particle segregation during centrifugal casting of metal matrix composites; Metallurgical and Materials Transactions; Vol. 37A; (2006); 1675-1687.
- [12] N. Poolthong, Qui P., Nomura H.; Primary particle distribution in cast iron by semi solid processing under centrifugal field; International Journal of Cast Metals Research; Vol. 16; (2003); 566-572.
- [13] H. Gottschalk; The cooling behavior of centrifugal castings; Advanced Engineering Materials; Vol. 1; (1999); 167-178.
- [14] L. Drenchev, Sobczak J., Malinov S., Wei Sha.; Numerical simulation of macrostructure formation in centrifugal casting of particle reinforced metal matrix composites. Part 1: model description; Modelling and Simulation in Material and Science Engineering; Vol. 11; (2003); 635-649.
- [15] S.R. Badu; Experimental Investigation of the Phenomenon of Centrifugal of Liquids; Metallurgical Transactions B; Vol. 24B; (1993); 463-473.
- [16] S. Yokoya, Iguchi M., Takagi S., Sakamoto M.; Numerical analysis of transient flow in a water bath contained in a cylindrical vessel suddenly set in rotation; ISIJ International; Vol 38; (1998); 421-429.
- [17] L. Changyun, Shiping W., Jingjie G., Yangping S., Weisheng B., Hengzhi F.; Model experiment of mold filling process in vertical centrifugal casting; Journal of Materials Processing Technology; Vol. 176; (2006); 268-272.
- [18] D. McBride, Humphreys N.J., Croft T. N., Green N. R., Cross M.; Complex free surface flows for mould filling using centrifugal casting; Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes; Vol. 12; (2009); 459-466.
- [19] J. H. Ferziger; Computational Methods for Fluid Dynamics; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; (2002); 25-54.
- [20] M. Griebel; Numerische Simulation in der Strömungsmechanik; Vieweg, Wiesbaden; (1995); 31-45.
- [21] J. H. Spurk, Aksel N.; Strömungslehre; Springer; (2006); 103-224.
- [22] I. N. Bronstein; Teuber- Taschenbuch der Mathematik; Teuber-Verlag; (2003); 103-288.

- [23] E. Zieniuk, Boltuc A.; Non-element method of solving 2D boundry problems defined on polygonal domains modeled by Navier equation; International Journal of Solids and Structures; Vol. 43; (2006); 7939-7958.
- [24] T. A. Khraishi, Zbib H. M.; Free-surface effects in 3D dislocation dynamics: formulation and modeling; Journal of Engineering Materials and Technology, Vol 124; (2002), 342-52.
- [25] K. A. Pericleous, Moran G.J., Bounds S.M., Chow P., Cross M.; Three dimensional free surface modelling in an unstructured mesh environment for metal processing applications, Applied Mathematical Modelling; Vol. 22.; (1998); 895-906.
- [26] S. Bounds; Moran G.; Pericleous K., Cross M., Croft T. N.; A computational model for defect prediction in shape castings based on the interaction of free surface flow, Heat Transfer, and Solidification Phenomena; Metallurgical and Materials Transactions B; Vol. 31B; (2000); 515-527.
- [27] P. Beeley; Foundry Technology; Butterworth-Heinemann; (2001); 622-675.
- [28] W. Nakayama, Ohtsuka Y.; Optimum charge of working fluids in horizontal rotating heat pipes; Heat and mass transfer in rotating machinery; (1984) 633-644.
- [29] A. Reikher, Barkhudarov M. R.; Casting: An analytical approach; Springer; (2007); 13-41.
- [30] H. Schlichtling, Gersten K.; Grenzschichttheorie; Springer; (2006); 101-141.
- [31] K. Hiemenz; Die Grenzschicht an einem in den gleichförmigen Flüssigkeitstrom eingetauchten geraden Kreiszyylinder; Dingl. Polytechn. J.; Vol. 326; (1911); 321.
- [32] F. M. White, Fluid Mechanics; McGraw Hill; (1988); 28-75.
- [33] H. G. Steger, Sieghart J., Glauning E., Technische Mechanik;Teuber-Verlag; Stuttgart; (1993); 214-245.
- [34] G. Martinez, Garnier M.; Durand F.; Stirring Phenomena in Centrifugal Casting of Pipes; Applied Scientific Research; Vol. 44; (1987); 225-239.
- [35] F. Roll; Handbuch der Giessereitechnik; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; (1959); 231-245.
- [36] P. Haasen; Physikalische Metallkunde; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York; (1974); 46-87.

- [37] D. Wittekopf; Stahlguss und Gusseisenlegierungen, Dt. Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, Stuttgart; (1992); 36-164.
- [38] E. Schürmann, J. von Hirsch; Erstarrungs- und Umwandlungsgleichgewichte des stabilen Systems Eisen-Silizium-Kohlenstoff; Giesserei 53; Nr. 12; (1966); 398-400.
- [39] R. W. Heine; Das Fe-C-Si-Erstarrungsdiagramm für Gusseisen; Giessereipraxis; Nr. 17; (1987); 239-247.
- [40] R. W. Heine; Carbon, Silicon, Carbon Equivalent, Solidification and thermal analysis relationships in gray und ductile cast irons; ASM Transactions; Vol. 81; (1973); 462-470.
- [41] F. Neumann; Einfluss der Eisenbegleiter auf Kohlenstofflöslichkeit, Kohlenstoffaktivität und Sättigungsgrad im Gusseisen; Gießerei 47; Nr. 2; (1960); 25-32.
- [42] Gießereikalender; Gießereiverlag; (1962); 48-163.
- [43] R. Monroe; C. E. Bates; Thermal analysis of ductile iron samples for graphite shape prediction; ASM Transactions; Vol. 90; (1990); 307-311.
- [44] B. Marincek; Zum Impfen von Gusseisen; Giesserei 62; Nr. 28; (1975); 692-694.
- [45] B. Lux; Zur Theorie der Bildung von Kugelgrafit im Gusseisen, 2. Teil, Theoretische Deutung der experimentellen Beobachtungen; Giessereiforschung 22; (1970); 161-178.
- [46] T. Skaland, Grong Ø., T. Grong; A model for the graphite formation in ductile cast iron; Metallurgical and Materials Transactions A; (1993); 2321-2345.
- [47] M. I. Onsøien, Grong Ø., Skaland T., Jørgensen K.; Mechanisms of graphite formation in ductile cast iron containing rare earth metals; Materials Science and Technology; Vol. 15; (1999); 253-259.
- [48] S. W. Yoon, Lee H. M.; A thermodynamic study of phase equilibria in the Sn-Pb-Bi solder System; CALPHAD 22; (1998); 167-178.
- [49] E. Kaschnitz; Österreichisches Giesserei Institut; Persönliche Mitteilung.

Anhang

A. Skizze Gestell



B. Berechnungen

Lagerberechnung:

Annahme: 2kg Masse am äußersten Punkt des Tellers

Drehzahl: 750 min⁻¹

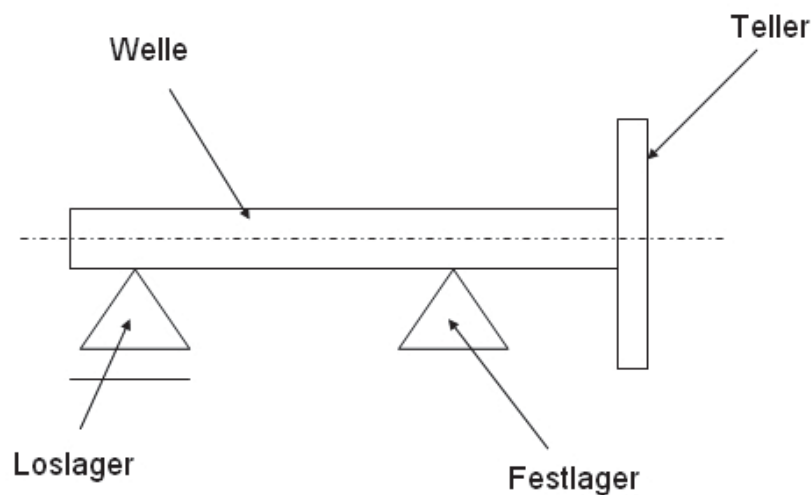


Abbildung B-1: Schema zur Lagerberechnung mit eingezeichneten Lagern

Auf Grund des Kräfte und Momentengleichgewichts (Summe der Kräfte und Momente ist gleich 0), ergibt sich, dass das Festlager das am stärksten Beanspruchte Lager ist. Für diese Lager wurde die Lebensdauer berechnet.

Die Lebensdauer des Lagers berechnet sich nach DIN ISO 281:

$$L=(C/P)^p$$

Dabei steht L für die Lebensdauer in 10⁶ Umdrehungen, C für die dynamische Tragzahl, P für die dynamische äquivalente Belastung und p für den Lebensdauerexponent.

Damit ergibt sich eine Lebensdauer für das verwendete SKF Type 2207 EKTN9 von 64*10⁶ Umdrehungen.

C. Tabellen

C-I: Geschlossene Kokille Mitnahme, kritische Geschwindigkeit

| Medium | Schichtdicke [mm] | Drehzahl [min ⁻¹] | Mittelwert Drehzahl [min ⁻¹] | Varianz | Std. Abw. | Umfangsg. [m/s] | Mittelw. Umfangsg. [m/s] |
|--------|-------------------|-------------------------------|--|---------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Wasser | 14,2 | 757,6 | 753,4 | 13 | 3,58 | 6,7 | 6,7 |
| Wasser | 14,2 | 750,9 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 755,8 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 749,7 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 755,8 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 746,7 | 0,0 | | | 6,6 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 755,2 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 14,2 | 755,8 | 0,0 | | | 6,7 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 727,3 | 729,3 | 3,9 | 1,98 | 6,5 | 6,5 |
| Wasser | 13,4 | 726,7 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 730,9 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 730,6 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 729,7 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 726,7 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 731,8 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 13,4 | 730,9 | 0,0 | | | 6,5 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 691,2 | 694,0 | 13 | 3,59 | 6,2 | 6,2 |
| Wasser | 12,4 | 692,1 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 700,0 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 699,4 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 689,1 | 0,0 | | | 6,1 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 692,4 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 693,9 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 12,4 | 693,6 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 676,1 | 674,5 | 4,1 | 2,02 | 6,0 | 6,0 |
| Wasser | 11,6 | 677,0 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 672,1 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 675,8 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 676,4 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 673,9 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 11,6 | 670,9 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |

| Medium | Schichtdicke [mm] | Drehzahl [min ⁻¹] | Mittelwert Drehzahl [min ⁻¹] | Varianz | Std. Abw. | Umfangsg. [m/s] | Mittelw. Umfangsg. [m/s] |
|--------|-------------------|-------------------------------|--|---------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Wasser | 11,6 | 673,9 | 0,0 | | | 6,0 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 652,7 | 655,1 | 7 | 2,65 | 5,8 | 5,8 |
| Wasser | 10,7 | 658,2 | 0,0 | | | 5,9 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 658,8 | 0,0 | | | 5,9 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 652,7 | 0,0 | | | 5,8 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 655,8 | 0,0 | | | 5,8 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 650,9 | 0,0 | | | 5,8 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 654,5 | 0,0 | | | 5,8 | 0,0 |
| Wasser | 10,7 | 657,0 | 0,0 | | | 5,8 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 640,9 | 638,7 | 6,6 | 2,57 | 5,7 | 5,7 |
| Wasser | 10,0 | 638,2 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 638,8 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 639,7 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 636,4 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 634,8 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 643,6 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 10,0 | 637,3 | 0,0 | | | 5,7 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 623,0 | 622,5 | 12 | 3,44 | 5,5 | 5,5 |
| Wasser | 9,2 | 620,6 | 0,0 | | | 5,5 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 624,8 | 0,0 | | | 5,6 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 617,9 | 0,0 | | | 5,5 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 625,8 | 0,0 | | | 5,6 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 627,9 | 0,0 | | | 5,6 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 617,6 | 0,0 | | | 5,5 | 0,0 |
| Wasser | 9,2 | 622,4 | 0,0 | | | 5,5 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 610,6 | 606,5 | 6,4 | 2,54 | 5,4 | 5,4 |
| Wasser | 8,4 | 603,0 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 606,4 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 608,5 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 603,6 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 607,6 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 603,9 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 8,4 | 608,2 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 595,8 | 590,6 | 5,9 | 2,42 | 5,3 | 5,3 |
| Wasser | 7,6 | 587,9 | 0,0 | | | 5,2 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 591,8 | 0,0 | | | 5,3 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 590,3 | 0,0 | | | 5,3 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 591,8 | 0,0 | | | 5,3 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 590,3 | 0,0 | | | 5,3 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 589,1 | 0,0 | | | 5,2 | 0,0 |
| Wasser | 7,6 | 587,9 | 0,0 | | | 5,2 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 575,8 | 574,8 | 1,9 | 1,38 | 5,1 | 5,1 |

| Medium | Schichtdicke [mm] | Drehzahl [min ⁻¹] | Mittelwert Drehzahl [min ⁻¹] | Varianz | Std. Abw. | Umfangsg. [m/s] | Mittelw. Umfangsg. [m/s] |
|--------|-------------------|-------------------------------|--|---------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Wasser | 6,8 | 574,5 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 573,0 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 576,7 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 573,9 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 576,4 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 575,2 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,8 | 572,7 | 0,0 | | | 5,1 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 548,5 | 547,7 | 7,2 | 2,69 | 4,9 | 4,9 |
| Wasser | 6,0 | 547,9 | 0,0 | | | 4,9 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 543,6 | 0,0 | | | 4,8 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 548,5 | 0,0 | | | 4,9 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 552,7 | 0,0 | | | 4,9 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 546,7 | 0,0 | | | 4,9 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 544,2 | 0,0 | | | 4,8 | 0,0 |
| Wasser | 6,0 | 549,1 | 0,0 | | | 4,9 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 523,0 | 524,0 | 1,6 | 1,28 | 4,7 | 4,7 |
| Wasser | 5,2 | 523,6 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 525,5 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 526,1 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 522,4 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 524,8 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 524,2 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 5,2 | 522,4 | 0,0 | | | 4,7 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 478,8 | 476,1 | 3,2 | 1,79 | 4,3 | 4,2 |
| Wasser | 4,5 | 477,0 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 475,8 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 478,2 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 473,9 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 475,2 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 476,4 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 4,5 | 473,3 | 0,0 | | | 4,2 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 425,5 | 419,9 | 12 | 3,53 | 3,8 | 3,7 |
| Wasser | 3,8 | 426,7 | 0,0 | | | 3,8 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 422,4 | 0,0 | | | 3,8 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 421,2 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 420,6 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 417,6 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 416,4 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 418,2 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 415,8 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 417,0 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |
| Wasser | 3,8 | 417,6 | 0,0 | | | 3,7 | 0,0 |

| Medium | Schichtdicke [mm] | Drehzahl [min ⁻¹] | Mittelwert Drehzahl [min ⁻¹] | Varianz | Std. Abw. | Umfangsg. [m/s] | Mittelw. Umfangsg. [m/s] |
|--------------|-------------------|-------------------------------|--|---------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Wasser | 3,1 | 338,8 | 338,4 | 5,5 | 2,35 | 3,0 | 3,0 |
| Wasser | 3,1 | 339,1 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 333,3 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 340,9 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 336,4 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 338,2 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 340,0 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| Wasser | 3,1 | 340,6 | 0,0 | | | 3,0 | 0,0 |
| | | | | | | | |
| Roses Metall | 3,0 | 486,4 | 486,7 | 1,6 | 1,26 | 4,3 | 4,3 |
| Roses Metall | 3,0 | 486,4 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 485,2 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 486,4 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 489,4 | 0,0 | | | 4,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 487,9 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 486,1 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 3,0 | 485,8 | 0,0 | | | 4,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 504,2 | 508,7 | 4,9 | 2,22 | 4,5 | 4,5 |
| Roses Metall | 4,0 | 510,9 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 510,9 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 507,6 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 507,3 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 507,9 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 509,7 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 4,0 | 510,9 | 0,0 | | | 4,5 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 606,1 | 606,6 | 1,5 | 1,21 | 5,4 | 5,4 |
| Roses Metall | 5,6 | 608,2 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 604,2 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 606,7 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 607,3 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 607,9 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 605,5 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 5,6 | 606,7 | 0,0 | | | 5,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 697,0 | 697,1 | 2,4 | 1,54 | 6,2 | 6,2 |
| Roses Metall | 7,3 | 695,2 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 699,4 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 695,2 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 697,0 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 696,4 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 697,6 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 7,3 | 699,4 | 0,0 | | | 6,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 772,7 | 773,8 | 0,5 | 0,69 | 6,9 | 6,9 |

| Medium | Schichtdicke [mm] | Drehzahl [min ⁻¹] | Mittelwert Drehzahl [min ⁻¹] | Varianz | Std. Abw. | Umfangsg. [m/s] | Mittelw. Umfangsg. [m/s] |
|--------------|-------------------|-------------------------------|--|---------|-----------|-----------------|--------------------------|
| Roses Metall | 9,0 | 773,0 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 773,3 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 773,6 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 773,9 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 774,2 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 774,5 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 9,0 | 774,8 | 0,0 | | | 6,9 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 806,1 | 806,4 | 3,3 | 1,81 | 7,2 | 7,2 |
| Roses Metall | 10,7 | 804,2 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 806,7 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 805,5 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 808,2 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 803,6 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 807,3 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 10,7 | 809,4 | 0,0 | | | 7,2 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 827,3 | 827,6 | 11 | 3,33 | 7,4 | 7,4 |
| Roses Metall | 12,9 | 824,2 | 0,0 | | | 7,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 823,6 | 0,0 | | | 7,3 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 827,0 | 0,0 | | | 7,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 826,7 | 0,0 | | | 7,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 831,8 | 0,0 | | | 7,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 833,9 | 0,0 | | | 7,4 | 0,0 |
| Roses Metall | 12,9 | 826,1 | 0,0 | | | 7,4 | 0,0 |

C-II: Geschlossene Kokille, kritische Drehzahl, Reibwert Lambda

| Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Reynolds | kinematische Viskosität [m ² /s] | Medium | Schichtdicke [mm] | Lambda |
|---------------------------------|----------|---|------------|----------------------|--------|
| | | | | | |
| 3,8 | 93677 | 0,000001 | Wasser | 14,2 | 0,216 |
| 2,1 | 85189 | 0,000001 | Wasser | 13,3 | 0,219 |
| 3,8 | 76585 | 0,000001 | Wasser | 12,4 | 0,222 |
| 1,4 | 69335 | 0,000001 | Wasser | 11,5 | 0,225 |
| 3,4 | 62334 | 0,000001 | Wasser | 10,7 | 0,228 |
| 2,5 | 56853 | 0,000001 | Wasser | 10 | 0,232 |
| 2,8 | 50965 | 0,000001 | Wasser | 9,2 | 0,236 |
| 1,4 | 45040 | 0,000001 | Wasser | 8,4 | 0,241 |
| 0,8 | 39666 | 0,000001 | Wasser | 7,5 | 0,246 |
| 4,3 | 34553 | 0,000001 | Wasser | 6,7 | 0,252 |
| 2,8 | 29257 | 0,000001 | Wasser | 6 | 0,259 |
| 2,9 | 24234 | 0,000001 | Wasser | 5,2 | 0,267 |
| 2,5 | 19054 | 0,000001 | Wasser | 4,5 | 0,277 |
| 2,2 | 14184 | 0,000001 | Wasser | 3,8 | 0,289 |
| 1,3 | 9330 | 0,000001 | Wasser | 3,1 | 0,304 |
| | | | | | |
| 1,4 | 280 | 0,000045 | Metallleg. | 3 | 0,335 |
| 2,37 | 397 | 0,000045 | Metallleg. | 3,9 | 0,310 |
| 1,3 | 671 | 0,000045 | Metallleg. | 5,6 | 0,281 |
| 1,25 | 999 | 0,000045 | Metallleg. | 7,2 | 0,263 |
| 0,74 | 1369 | 0,000045 | Metallleg. | 8,9 | 0,250 |
| 2,4 | 1783 | 0,000045 | Metallleg. | 10,7 | 0,240 |
| 1,94 | 2319 | 0,000045 | Metallleg. | 12,9 | 0,230 |

C-III: Geschlossene Kokille, Mitnahme, Winkel

| Winkel vor [°] | Schichtdicke | Drehzahl [min ⁻¹] | Umfangsgeschwindigkeit [m/s] |
|----------------|--------------|-------------------------------|------------------------------|
| 38,2 | 7,5 | 0 | 0,0 |
| 38,8 | 7,5 | 100 | 0,5 |
| 39 | 7,5 | 200 | 1,1 |
| 39,4 | 7,5 | 300 | 1,6 |
| 41,4 | 7,5 | 400 | 2,2 |
| 42,8 | 7,5 | 500 | 2,7 |
| 46 | 7,5 | 600 | 3,2 |
| 49,7 | 7,5 | 700 | 3,8 |
| 54 | 7,5 | 800 | 4,3 |
| 60,2 | 7,5 | 900 | 4,9 |
| 72,3 | 7,5 | 950 | 5,1 |
| | | | |
| 41,5 | 6,7 | 0 | 0,0 |
| 42,4 | 6,7 | 100 | 0,5 |
| 43,4 | 6,7 | 200 | 1,1 |
| 44,2 | 6,7 | 300 | 1,6 |
| 45,4 | 6,7 | 400 | 2,2 |
| 47,7 | 6,7 | 500 | 2,7 |
| 51,1 | 6,7 | 600 | 3,2 |
| 55,5 | 6,7 | 700 | 3,8 |
| 59,5 | 6,7 | 800 | 4,3 |
| 65,2 | 6,7 | 850 | 4,6 |
| 82 | 6,7 | 900 | 4,9 |
| | | | |
| 44,8 | 6 | 0 | 0,0 |
| 45,9 | 6 | 100 | 0,5 |
| 46,8 | 6 | 200 | 1,1 |
| 48,8 | 6 | 300 | 1,6 |
| 50,4 | 6 | 400 | 2,2 |
| 53,2 | 6 | 500 | 2,7 |
| 58,1 | 6 | 600 | 3,2 |
| 67,4 | 6 | 700 | 3,8 |
| 78,2 | 6 | 800 | 4,3 |
| 92 | 6 | 850 | 4,6 |
| | | | |
| 48,71 | 5,2 | 0 | 0,0 |
| 50,34 | 5,2 | 100 | 0,5 |
| 53,3 | 5,2 | 200 | 1,1 |
| 56,5 | 5,2 | 300 | 1,6 |
| 59,75 | 5,2 | 400 | 2,2 |
| 65,43 | 5,2 | 500 | 2,7 |
| 81,4 | 5,2 | 600 | 3,2 |
| 102 | 5,2 | 700 | 3,8 |
| 127,2 | 5,2 | 800 | 4,3 |

| Winkel vor [°] | Schichtdicke | Drehzahl [min ⁻¹] | Umfangsgeschwindigkeit [m/s] |
|----------------|--------------|-------------------------------|------------------------------|
| 54 | 4,5 | 0 | 0,0 |
| 56 | 4,5 | 100 | 0,5 |
| 57,1 | 4,5 | 200 | 1,1 |
| 62,2 | 4,5 | 300 | 1,6 |
| 70,1 | 4,5 | 400 | 2,2 |
| 80,75 | 4,5 | 500 | 2,7 |
| 93,45 | 4,5 | 600 | 3,2 |
| 114,2 | 4,5 | 700 | 3,8 |
| 128,2 | 4,5 | 750 | 4,0 |
| | | | |
| 55 | 3,8 | 0 | 0,0 |
| 56,8 | 3,8 | 100 | 0,5 |
| 58 | 3,8 | 200 | 1,1 |
| 62,95 | 3,8 | 300 | 1,6 |
| 71 | 3,8 | 400 | 2,2 |
| 81,71 | 3,8 | 500 | 2,7 |
| 98,4 | 3,8 | 600 | 3,2 |
| 124,12 | 3,8 | 700 | 3,8 |
| | | | |
| 22,87 | 14,2 | 0 | 0,0 |
| 23,47 | 14,2 | 100 | 0,5 |
| 24,02 | 14,2 | 200 | 1,1 |
| 25,03 | 14,2 | 300 | 1,6 |
| 26,09 | 14,2 | 400 | 2,2 |
| 27,38 | 14,2 | 500 | 2,7 |
| 29,44 | 14,2 | 600 | 3,2 |
| 32,52 | 14,2 | 700 | 3,8 |
| 35,64 | 14,2 | 800 | 4,3 |
| 37,34 | 14,2 | 900 | 4,9 |
| 36,69 | 14,2 | 1000 | 5,4 |
| 37,23 | 14,2 | 1100 | 5,9 |
| 39,21 | 14,2 | 1150 | 6,2 |
| 51,68 | 14,2 | 1200 | 6,5 |
| 63,57 | 14,2 | 1250 | 6,7 |
| 89,68 | 14,2 | 1300 | 7,0 |

C-IV: Geschlossene Kokille: Mitnahme Lambda

| Schichtdicke | Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Reynolds | Kinematische Viskosität [m ² /s] | Lambda |
|--------------|------------------------------|-------------|---|------------|
| | | | | |
| 7,55 | 0,539465405 | 8750,128872 | 0,000001 | 0,21542544 |
| 7,55 | 1,07893081 | 17500,25774 | 0,000001 | 0,21280111 |
| 7,55 | 1,618396215 | 26250,38662 | 0,000001 | 0,21190105 |
| 7,55 | 2,157861621 | 35000,51549 | 0,000001 | 0,21142332 |
| 7,55 | 2,697327026 | 43750,64436 | 0,000001 | 0,2111372 |
| 7,55 | 3,236792431 | 52500,77323 | 0,000001 | 0,2109465 |
| 7,55 | 3,776257836 | 61250,9021 | 0,000001 | 0,21081025 |
| 7,55 | 4,315723241 | 70001,03097 | 0,000001 | 0,210708 |
| 7,55 | 4,855188646 | 78751,15985 | 0,000001 | 0,21059102 |
| 7,55 | 5,124921349 | 83126,22428 | 0,000001 | 0,21056311 |
| | | | | |
| 6,75 | 0,539465405 | 7735,93391 | 0,000001 | 0,22048102 |
| 6,75 | 1,07893081 | 15471,86782 | 0,000001 | 0,21772685 |
| 6,75 | 1,618396215 | 23207,80173 | 0,000001 | 0,21679552 |
| 6,75 | 2,157861621 | 30943,73564 | 0,000001 | 0,21630053 |
| 6,75 | 2,697327026 | 38679,66955 | 0,000001 | 0,2160042 |
| 6,75 | 3,236792431 | 46415,60346 | 0,000001 | 0,21580676 |
| 6,75 | 3,776257836 | 54151,53737 | 0,000001 | 0,2156657 |
| 6,75 | 4,315723241 | 61887,47128 | 0,000001 | 0,21555986 |
| 6,75 | 4,585455944 | 65755,43824 | 0,000001 | 0,2154695 |
| 6,75 | 4,855188646 | 69623,40519 | 0,000001 | 0,21543781 |
| | | | | |
| 6 | 0,539465405 | 6770,290835 | 0,000001 | 0,22618615 |
| 6 | 1,07893081 | 13540,58167 | 0,000001 | 0,22332112 |
| 6 | 1,618396215 | 20310,8725 | 0,000001 | 0,22235387 |
| 6 | 2,157861621 | 27081,16334 | 0,000001 | 0,221839 |
| 6 | 2,697327026 | 33851,45417 | 0,000001 | 0,22153094 |
| 6 | 3,236792431 | 40621,74501 | 0,000001 | 0,22132573 |
| 6 | 3,776257836 | 47392,03584 | 0,000001 | 0,22117915 |
| 6 | 4,315723241 | 54162,32668 | 0,000001 | 0,22106918 |
| 6 | 4,585455944 | 57547,4721 | 0,000001 | 0,22102389 |
| | | | | |
| 5,2 | 0,539465405 | 5691,360024 | 0,000001 | 0,23407066 |
| 5,2 | 1,07893081 | 11382,72005 | 0,000001 | 0,23104957 |
| 5,2 | 1,618396215 | 17074,08007 | 0,000001 | 0,23003204 |
| 5,2 | 2,157861621 | 22765,4401 | 0,000001 | 0,22948924 |
| 5,2 | 2,697327026 | 28456,80012 | 0,000001 | 0,22916469 |
| 5,2 | 3,236792431 | 34148,16015 | 0,000001 | 0,22894859 |
| 5,2 | 3,776257836 | 39839,52017 | 0,000001 | 0,22879426 |
| 5,2 | 4,315723241 | 45530,8802 | 0,000001 | 0,22867851 |
| | | | | |

| Schichtdicke | Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Reynolds | Kinematische Viskosität [m ² /s] | Lambda |
|--------------|---------------------------------|-------------|---|------------|
| 4,5 | 0,539465405 | 4369,669782 | 0,000001 | 0,24718441 |
| 4,5 | 1,07893081 | 8739,339564 | 0,000001 | 0,24389646 |
| 4,5 | 1,618396215 | 13109,00935 | 0,000001 | 0,24279364 |
| 4,5 | 2,157861621 | 17478,67913 | 0,000001 | 0,24220321 |
| 4,5 | 2,697327026 | 21848,34891 | 0,000001 | 0,2418506 |
| 4,5 | 3,236792431 | 26218,01869 | 0,000001 | 0,24161596 |
| 4,5 | 3,776257836 | 30587,68847 | 0,000001 | 0,24144847 |
| 4,5 | 4,045990539 | 32772,52336 | 0,000001 | 0,24138149 |
| | | | | |
| 3,8 | 0,539465405 | 4315,723241 | 0,000001 | 0,24783703 |
| 3,8 | 1,07893081 | 8631,446483 | 0,000001 | 0,24453555 |
| 3,8 | 1,618396215 | 12947,16972 | 0,000001 | 0,24342844 |
| 3,8 | 2,157861621 | 17262,89297 | 0,000001 | 0,2428356 |
| 3,8 | 2,697327026 | 21578,61621 | 0,000001 | 0,24248157 |
| 3,8 | 3,236792431 | 25894,33945 | 0,000001 | 0,242246 |
| 3,8 | 3,776257836 | 30210,06269 | 0,000001 | 0,24207785 |
| | | | | |
| 14,2 | 0,539465405 | 14053,0738 | 0,000001 | 0,19810121 |
| 14,2 | 1,07893081 | 28106,14761 | 0,000001 | 0,19576536 |
| 14,2 | 1,618396215 | 42159,22141 | 0,000001 | 0,19497088 |
| 14,2 | 2,157861621 | 56212,29522 | 0,000001 | 0,1945511 |
| 14,2 | 2,697327026 | 70265,36902 | 0,000001 | 0,19429928 |
| 14,2 | 3,236792431 | 84318,44283 | 0,000001 | 0,1941313 |
| 14,2 | 3,776257836 | 98371,51663 | 0,000001 | 0,1940112 |
| 14,2 | 4,315723241 | 112424,5904 | 0,000001 | 0,19392105 |
| 14,2 | 4,855188646 | 126477,6642 | 0,000001 | 0,1938209 |
| 14,2 | 5,394654052 | 140530,738 | 0,000001 | 0,19377326 |
| 14,2 | 5,934119457 | 154583,8118 | 0,000001 | 0,1937334 |
| 14,2 | 6,203852159 | 161610,3488 | 0,000001 | 0,19371581 |
| 14,2 | 6,473584862 | 168636,8857 | 0,000001 | 0,19369956 |
| 14,2 | 6,743317565 | 175663,4226 | 0,000001 | 0,19368449 |
| 14,2 | 7,013050267 | 182689,9595 | 0,000001 | 0,19367048 |

C-V: Offene Kokille, Abstand

| Eingussmenge [g] | Temperatur [°C] | Drehzahl [min ⁻¹] | Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Anzahl | Abstand [mm] | Mittelwert |
|---------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------|------------|
| 450 | 20 | 133 | 1,18 | 8 | 4,6 | 4,75 |
| | | | | | 4,8 | |
| | | | | | 4,8 | |
| | | | | | 4,9 | |
| | | | | | 4,8 | |
| | | | | | 4,7 | |
| | | | | | 4,6 | |
| | | | | | 4,8 | |
| 1450 | 20 | 167 | 1,48 | 8 | 4,3 | 4,5625 |
| | | | | | 4,9 | |
| | | | | | 4,5 | |
| | | | | | 4,6 | |
| | | | | | 4,7 | |
| | | | | | 4,6 | |
| | | | | | 4,5 | |
| | | | | | 4,4 | |
| 2500 | 80 | 242 | 2,15 | 8 | 4,3 | 4,15 |
| | | | | | 4,1 | |
| | | | | | 4 | |
| | | | | | 4,1 | |
| | | | | | 4,2 | |
| | | | | | 4,3 | |
| | | | | | 4 | |
| | | | | | 4,2 | |

C-VI: Offene Kokille, Lambda

| Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Reynolds | Kinematische Viskosität [m ² /s] | Lmbda |
|---------------------------------|----------|---|-------|
| 1,18 | 3146 | 0,00000045 | 0,403 |
| 1,48 | 3946 | 0,00000045 | 0,402 |
| 2,15 | 5733 | 0,00000045 | 0,402 |

C-VII: Teller, Lambda

| Umfangsgeschwindigkeit [m/s] | Reynolds | Kinematische Viskosität [m ² /s] | Lambda |
|---------------------------------|----------|---|--------|
| 5,7 | 35670 | 0,00000016 | 0,426 |
| 5,2 | 32724 | 0,00000016 | 0,406 |
| 4,9 | 30761 | 0,00000016 | 0,400 |
| 4,4 | 27750 | 0,00000016 | 0,398 |
| 3,2 | 19831 | 0,00000016 | 0,393 |

C-IX: Teller, Abstand

| Drehzahl [min ⁻¹] | Abgussgewicht [g] | Gießdauer [s] | Vorwärtsströmung [mm] | Mittelwert [mm] |
|-------------------------------|----------------------|------------------|--------------------------|--------------------|
| 500 | 2505 | 7,1 | 50,7 | 50,6 |
| | | | 47,2 | |
| | | | 58,7 | |
| | | | 63,2 | |
| | | | 43,6 | |
| | | | 48,0 | |
| | | | 42,7 | |
| 500 | 2500 | 7,5 | 38,9 | 32,4 |
| | | | 30,0 | |
| | | | 28,9 | |
| | | | 26,1 | |
| | | | 33,3 | |
| | | | 29,4 | |
| | | | 31,7 | |
| | | | 40,6 | |

| Drehzahl [min-1] | Abgussgewicht [g] | Gießdauer [s] | Vorwärtsströmung [mm] | Mittelwert [mm] |
|------------------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 469,6969697 | 2503 | 6,5 | 27,2 | 22,7 |
| | | | 15,9 | |
| | | | 23,4 | |
| | | | 26,9 | |
| | | | 19,1 | |
| | | | 24,3 | |
| | | | 24,6 | |
| | | | 20,5 | |
| 469,6969697 | 2504 | 5,7 | 31,4 | 27,9 |
| | | | 31,1 | |
| | | | 25,5 | |
| | | | 25,8 | |
| | | | 23,9 | |
| | | | 30,5 | |
| | | | 31,1 | |
| | | | 24,2 | |
| 424,2424242 | 2506 | 6,25 | 23,6 | 22,3 |
| | | | 14,0 | |
| | | | 24,5 | |
| | | | 21,6 | |
| | | | 25,2 | |
| | | | 22,3 | |
| | | | 24,1 | |
| | | | 23,0 | |
| 424,2424242 | 2501 | 6,45 | 24,0 | 28,7 |
| | | | 23,7 | |
| | | | 29,3 | |
| | | | 34,9 | |
| | | | 34,5 | |
| | | | 31,3 | |
| | | | 22,4 | |
| | | | 29,6 | |
| 545,4545455 | 2503 | 5,25 | 21,7 | 23,3 |
| | | | 19,1 | |
| | | | 18,4 | |
| | | | 16,4 | |
| | | | 22,4 | |
| | | | 30,3 | |
| | | | 22,0 | |
| | | | 35,9 | |
| | | | | |

| Drehzahl [min-1] | Abgussgewicht [g] | Gießdauer [s] | Vorwärtsströmung [mm] | Mittelwert [mm] |
|------------------|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 303,030303 | 2504 | 5,54 | 29,8 | 28,9 |
| | | | 28,2 | |
| | | | 29,8 | |
| | | | 26,2 | |
| | | | 24,6 | |
| | | | 32,1 | |
| | | | 29,4 | |
| | | | 31,0 | |
| 500 | 2501 | 7,63 | 28,4 | 30,8 |
| | | | 29,4 | |
| | | | 33,3 | |
| | | | 29,8 | |
| | | | 29,1 | |
| | | | 29,8 | |
| | | | 34,4 | |
| | | | 31,9 | |
| 303,030303 | 2504 | 6,42 | 28,3 | 45,0 |
| | | | 36,5 | |
| | | | 45,6 | |
| | | | 47,8 | |
| | | | 50,9 | |
| | | | 54,4 | |
| | | | 42,5 | |
| | | | 53,8 | |